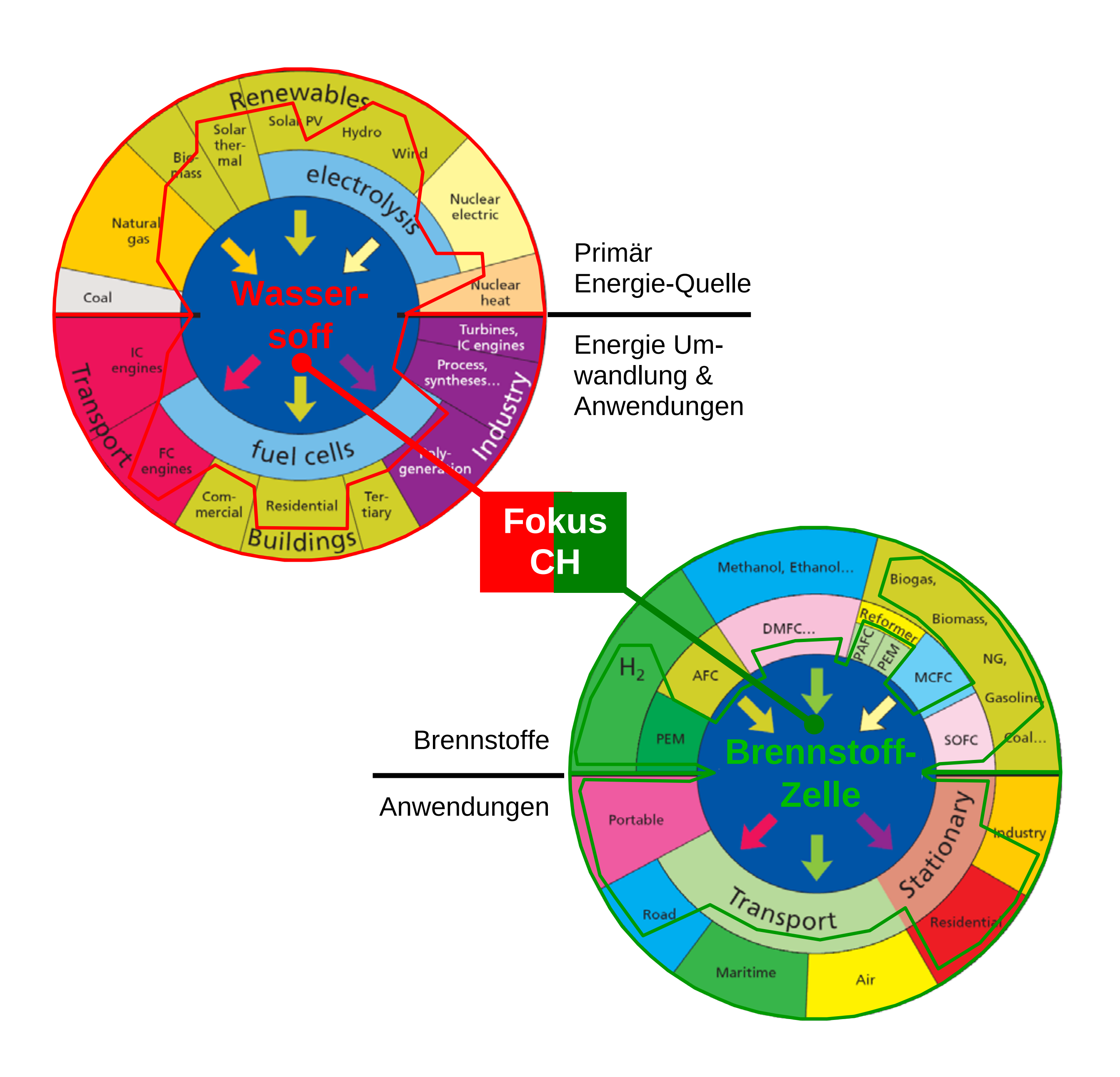
Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

Bundesamt für Energie BFE

ENERGIEFORSCHUNGSPROGRAMME WASSERSTOFF UND BRENNSTOFFZELLEN FÜR DIE JAHRE 2008-2011



Impressum

Datum: Dezember 2007

Autoren: Andreas Gut BFE, Andreas Luzzi & Michael Spirig

Bundesamt für Energie, CH-3003 Bern, Tel. 031 322 56 11, www.bfe.admin.ch

Bezugsort der Publikation: www.energieforschung.ch

Titelbild: Vielfalt der für die Produktion von H_2 einsetzbaren primären Energie-Quellen, H_2-Umwandlungs- und Brennstoffzelltechnologien sowie Anwendungen.
Der obere, linke Kreis zeigt
- oben die, für die Produktion von Wasserstoff einsetzbaren primären Energie-Quellen
- unten die verschiedenen Energie Umwandlungsmöglichkeiten und Anwendungen.

Der untere, rechte Kreis zeigt
- oben die möglichen Brennstoffe für die unterschiedlichen Brennstoffzelltechnologien
- unten die verschiedenen Einsatz- und Anwendungsmöglichkeiten [4].

Schwarz umrahmt sind die Fokusgebiete der Energieforschungsprogramme Wasserstoff und Brennstoffzellen

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung

Die Programme Wasserstoff & Brennstoffzellen des Bundesamts für Energie umfassen die Schweizer Aktivitäten auf den Gebieten der (H2) Wasserstoff-Herstellung, -Speicherung und der Brennstoffzellen (BZ oder FC für Fuel Cell). Folgende **Technologien** stehen hierbei im Vordergrund:
H2 - Hochdruck-Elektolyse, photokatalytische-Elektrolyse, Metalloxid-Zyklus
- Feststoff-Speicherung in komplexen Metallhydriden
BZ - Polymer-Elektrolyt Brennstoffzelle PEFC für portable und mobile Anwendungen und
- Solid Oxyd Brennstoffzelle SOFC für stationäre und Micro-Anwendung (WKK, Batterieersatz)

Das vorliegende Konzept für die Jahre 2008 - 2011 orientiert sich einerseits an den Erfahrungen aus vorhergehenden Perioden und orientiert sich andererseits an der nachfolgend beschriebenen Ausgangslage. Programmziele und Forschungsschwerpunkte sind darauf fokussiert die CH-Potentiale und Stärken optimal einzusetzen und auszubauen, so dass die Vorgaben einer nachhaltigen Energie- und Wirtschaftspolitik erreicht werden.

A.) Ausgangslage

Die Vision einer „Wasserstoffwirtschaft" wird international breit diskutiert und abgestützt, insbesondere aufgrund der erwarteten Vorteile bezüglich Versorgungssicherheit, Treibhausgasreduktion, Luftqualität, Gesundheitsrelevanz und Wettbewerbsfähigkeit. Neben dem Wasserstoff als Energieträger sind Brennstoffzellen als emissionsarme, elektrochemische Energiewandler mit höchsten Wirkungsgraden ein tragender Innovationsbaustein mit beispielhaft folgendem ökologischen und ökonomischen Potential für 2050 [IEA International Energy Agency]: Brennstofffahrzeuganteil ca. 42% (U-SA), weltweite CO_2-Reduktion ca. 5%, kumulative Gesamtleistung von Brennstoffzellenkraftwerken ca. 250 GW, dominante Wasserstoffproduktion über dezentrale Dampfreformation von Erdgas. Die "European Hydrogen and Fuel Cell Technology Platform HFP" geht von folgenden Schätzungen für die Anzahl verkaufter Einheiten pro Jahr um 2020 aus: Brennstoffzellen als Batterieersatz ~ 250 Millionen, portable und stationäre Brennstoffzellen je ca. 100'000, Brennstoffzellen für Fahrzeuge ca. 0.4 - 1.8 Millionen.

Heute wird Wasserstoff bereits in riesigen Mengen für nicht-energetische Zwecke hergestellt. Die Jahresproduktion beträgt ca. 62 Millionen Tonnen, was einem Energieäquivalent von 4.3% der Weltjahreserdölproduktion entspricht. Weltweit wurden etwas über 20'000 Brennstoffzellesysteme verkauft. Dominant sind portable Geräte, gefolgt von Stationäranwendungen im Kilowatt-Bereich und Anwendungen für die Mobilität.

Der **Stand der Technik** ist unterschiedlich. In den Bereichen Wasserstoffproduktion, Speicherung und Distribution sind zuverlässige Lösungen vorhanden, bezüglich Effizienz, Sicherheit und Einsatz von erneuerbaren Energien bedarf es aber noch einiger Forschungsbemühungen. Brennstoffzellen sind zwar mannigfaltig in Demonstratoren und Prototypen im Einsatz, die Produktreife konnte jedoch aufgrund der mangelnden Lebensdauer, Zuverlässigkeit und zu hoher Kosten noch nicht erreicht werden.

Für die Realisierung der Vision „Wasserstoffwirtschaft" sind in der USA, Japan und auch der EU international vernetzte **Langzeit-F&E-Initiativen** mit entsprechenden Roadmaps und Milestones am laufen. Auch die Schweiz leistet auf der Basis ihrer Potentiale einen wesentlichen Beitrag für die erfolgreiche Umsetzung der EU Zielpläne.

B.) CH-Potenziale

In der Schweiz können gemäss **CORE Roadmap** insgesamt bis zu 85 PJ Wasserstoff bereitgestellt werden, 13% durch Gebäude integrierte Photoelektrolyse und 87% durch nukleare Hochtemperaturelektrolyse. Das Wasserstoffpotential hängt stark von den Rahmenbedingungen ab und ist aus Sicht der gegenwärtigen Gegebenheiten beurteilt worden. Die grössten Potentiale bei der Anwendung von Brennstoffzellen liegen bei PEFC im Verkehrsbereich (84 PJ) und bei SOFC sowie MCFC (=Molten Carbonate Brennstoffzelle) für die Bereitstellung von Prozesswärme (85 PJ). Die fossile Anwendung von SOFC im Gebäudebereich (33 PJ) ist als Übergangstechnologie zu sehen, die durch Biogas-SOFC abgelöst wird.

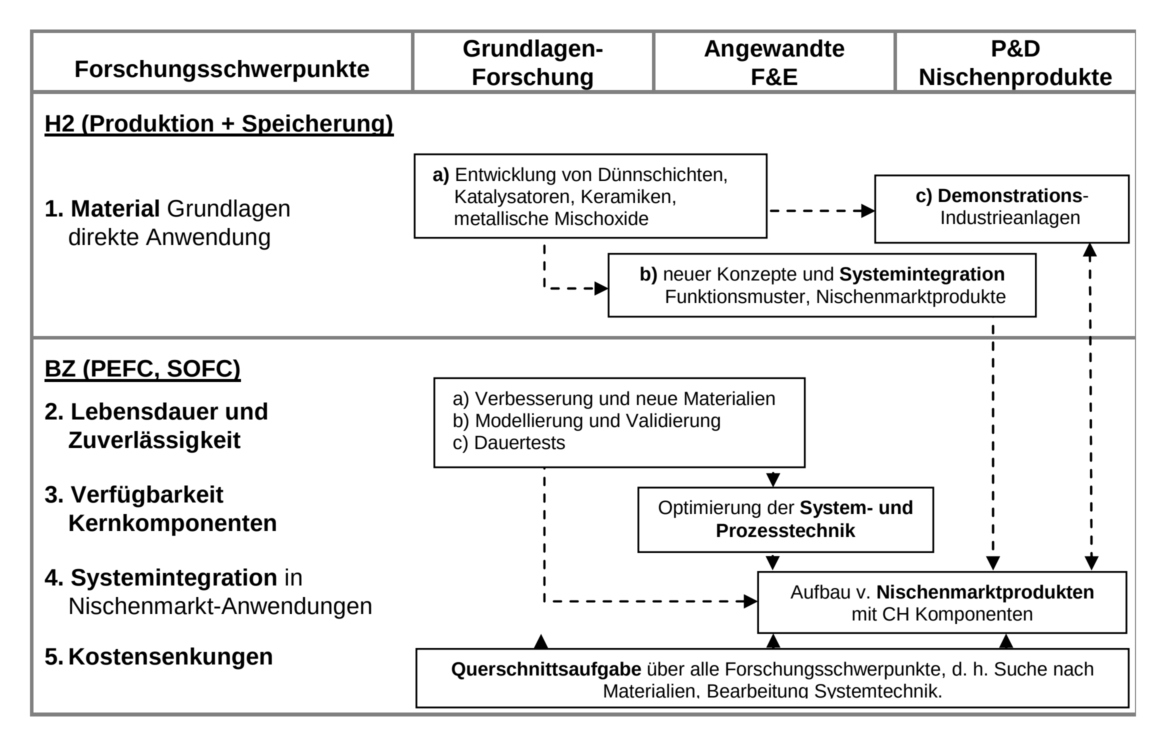
Grosse **Stärken** für die F&E sowie Umsetzung sind in der Schweiz die hohe Transparenz, die gute nationale Vernetzung und Zusammenarbeit sowie die hohe Kompetenzen. Die Forschungszentren ETH's, PSI und EMPA sind in führender Position und werden von den Fachhochschulgruppen besonders im P&D-Bereich optimal ergänzt. Auch die internationale Zusammenarbeit ist im Rahmen der IEA gut etabliert und die Schweiz beteiligt sich aktiv an der Strukturierung und Vernetzung des Europäischen Forschungsraumes. Die Beteiligung der Industrie ist mit zirka 30 aktiven Firmen vorhanden a-

ber noch stark auszubauen. Chancen bestehen im Aufbau einer Zulieferindustrie und Originalgeräteherstellung.

Die **Investitionen der öffentlichen Hand** betrugen im Mittel der Jahre 2003 – 2005 rund 2.5 Mio. Franken für die Wasserstoffforschung und circa 6.3 Mio. Franken für Brennstoffzellenforschung und ermöglichen damit das bestehende Grundmass an Aktivitäten. Ein Ausbaupotential besteht, sobald die im Konzept der Energieforschung des Bundes 2008 – 2011 formulierten Ziele für die Erhöhung des Mitteleinsatzes der öffentlichen Hand umgesetzt werden und sich vermehrt Drittmittel mobilisieren lassen.

C.) Ziele und Forschungsschwerpunkte

Die **technischen und wirtschaftlichen Zielsetzungen** der Programme sind mit den oben aufgeführten Potentialen sowie den Zielplänen der Europäischen Kommission, d.h. der EU Roadmap abgeglichen und im Energieforschungskonzept des Bundes verankert. Sehr wichtig für die Schweiz ist dabei das zielgerichtete Fortführen der Grundlagenforschung für den Erhalt von Fachkompetenzen und Exzellenz. Das Sammeln von Erfahrungen mittels Pilot- und Demonstrationsprojekten wird auf die gebäudeintegrierte Wasserstoffkette (Produktion, Speicherung, Anwendung) und auf die energetische Verwendung von Wasserstoff im Mobilitätsbereich fokussiert. Bis 2011 werden vorbereitende Arbeiten und, soweit das Engagement der Kommunen, Kantone und Privatwirtschaft gewonnen werden kann und es die Budget-Situation im P+D-Bereich erlaubt, die Umsetzung in Angriff genommen. Begleitende erste Demonstrationsaktivitäten sollen bis 2011 bei EnergieSchweiz verankert und auf die dezentralisierte WKK-Anwendung von Festoxid-Brennstoffzellen SOFC fokussiert werden. Dies dient als Brückenschlag zur Marktumsetzung, welche dem Portfolio der KTI zugesprochen wird.
Nachfolgende Tabelle fasst die **Forschungsschwerpunkte** des Programms Wasserstoff und Brennstoffzellen und Zuteilung zum entsprechenden F&E, respektive P&D Bereich zusammen.

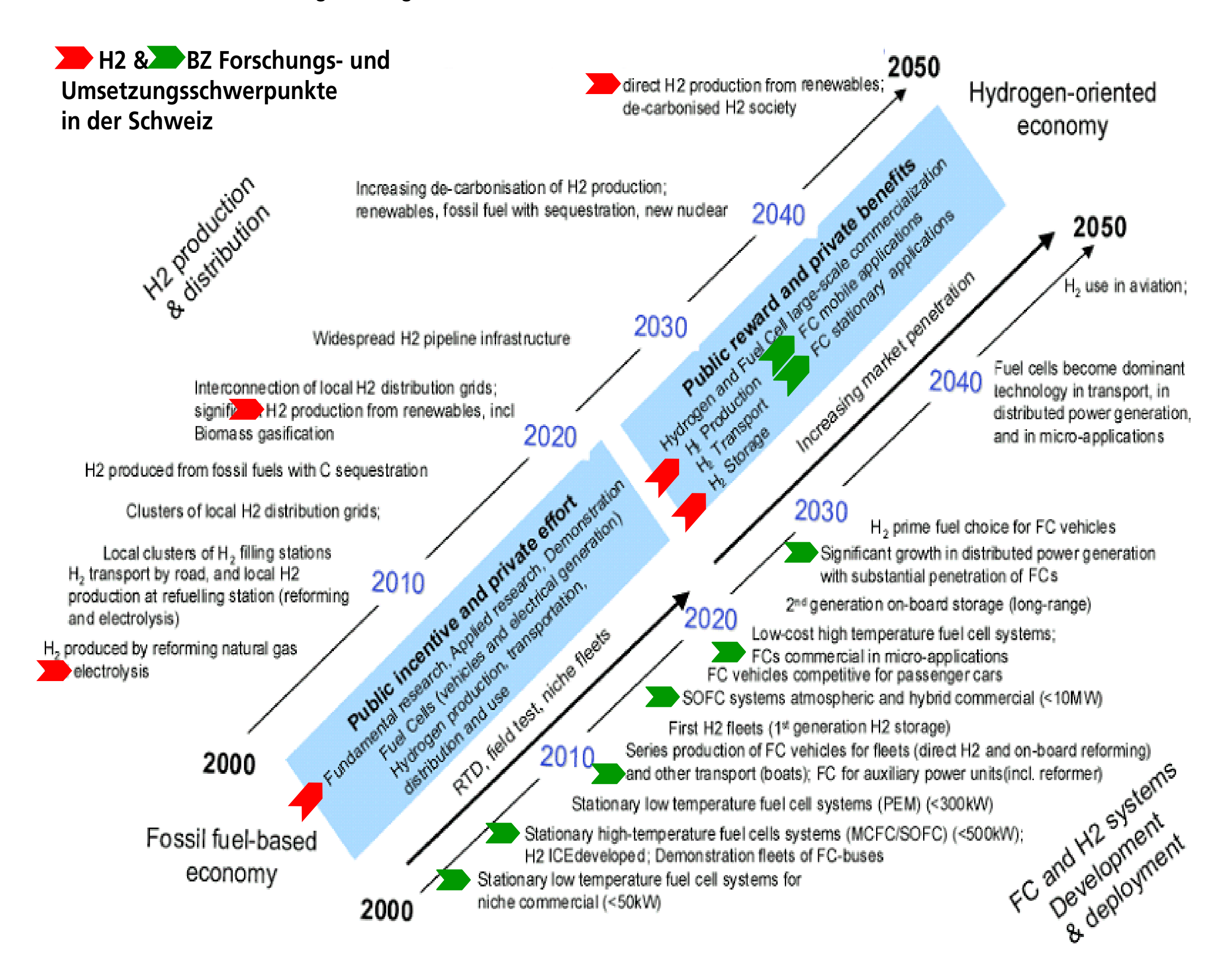


Ziele und Forschungsschwerpunkte der Programme Wasserstoff und Brennstoffzellen sowie Zuteilung zur Grundlagen und angewandten F&E- respektive zum P&D- und Nischenprodukt-Bereich.

1. Einleitung

Die Vision eines Wasserstoff- und Brennstoffzellen-basierten, neuen, integrierten Energiesystems sowie deren Umsetzung sind international breit diskutiert und abgestützt. Für den Europäischen Raum wird sie in ***Hydrogen Energy and Fuel Cells - A vision of our future*** zusammengefasst. In diesem Dokument sind auch die relevanten Vorteile bezüglich Versorgungssicherheit, Treibhausgasreduktion, Luftqualität, Gesundheitsrelevanz und Wettbewerbsfähigkeit aufgeführt [3].

Wasserstoff und Brennstoffzellen sind eng miteinander verbunden was deren Einsatz für Energiezwecke betrifft (siehe auch Titelbild). Während Brennstoffzellen geräuschlose elektrochemische Energiewandler mit höchsten Wirkungsgraden darstellen, beansprucht Wasserstoff die Rolle des für Brennstoffzellen effizientesten, Kohlenstoff-freien und potentiell überall verfügbaren Energieträgers. Der **Markt für die Anwendung von Brennstoffzellen und Wasserstoff im Energiebereich ist erst im Aufbau**. Der Grund liegt in den technischen und wirtschaftlichen Barrieren, die einen Langzeit-Fokus von mindestens 15-20 Jahren in Forschung, Entwicklung und Demonstration erfordern (siehe Figur 1.1). Die IEA kommt zudem zum Schluss, dass Wasserstoff nur dann Eingang in den Markt findet, wenn günstige Rahmenbedingungen *aktiv* geschaffen werden. Findet dies nicht statt, würden sich die Konkurrenztechnologien aufgrund von Marktbarrieren durchsetzen.



Figur 1.1: *Europäische Roadmap für den Übergang von einer fossilen zu einer Wasserstoff orientierten Wirtschaft [4]. Mit den farbigen Pfeilen sind die Schweizer Forschungs- und Umsetzungsschwerpunkte angedeutet.*

Die fokussiert angelegten Forschungs- und Entwicklungsinitiativen, wie sie sowohl in der EU, den USA als auch Japan vorangetrieben werden, sind ein Zeichen, dass weltweit der Wille vorhanden ist, die Rahmenbedingungen aktiv zu verbessern und Wasserstoff zum Durchbruch zu verhelfen. Basis für das zielgerichtete Vorgehen bilden die Roadmaps in den sich die Schweizer Forschungsarbeiten

an zentralen Punkten platzieren lassen (siehe Titelbild und Figur 1.1). Die technologischen Hauptstossrichtungen haben sich in der Schweiz aufgrund der vorhandenen Kompetenzen sowie der Auswahl der wichtigsten, entwicklungsfähigen technischen Potentiale in folgenden Bereichen herausgebildet:

Wasserstoff: Produktion - Hochdruck-Elektolyse, photokatalytische-Elektrolyse, Metalloxid-Zyklus
Speicherung - Metallhydride

Brennstoffzelle: PEFC für portable und mobile Anwendungen
SOFC für stationäre und Micro-Anwendung (WKK, Batterieersatz)

Auf Programmebene ergeben sich für die **Programme Wasserstoff und Brennstoffzellen** des Bundesamts für Energie folgende Aktionsbereiche:

1. Begleitung und Koordination der Forschung, Entwicklung und Demonstration der Schweizer Akteure und wo sinnvoll Vernetzung zur Nutzung von Synergien; Hauptziel ist hierbei auf effiziente Weise Beiträge zu den Zielen des Konzepts der Energieforschung des Bundes [1] zu erwirken.
2. Der Schwerpunkt der Förderaktivität liegt auf der angewandten Forschung und Entwicklung und beim Transfer der Resultate in die Industrie. Die Industrie wird nur subsidiär unterstützt und ein Transfer erfolgt nur dann, wenn die Rahmenbedingungen für die Integration einer neuen Technologie im Markt günstig sind.
3. Die nationalen Forschungsaktivitäten werden in den internationalen Aktivitäten eingebettet. Die Programme Wasserstoff und Brennstoffzellen sorgen für einen angemessenen Informationsaustausch und fördern die Teilnahme nationaler Akteure an internationalen Projekten und Programmen.
4. Initiierung von unterstützenden Aktivitäten, welche die Hauptschwachpunkte* der Schweizer Wasserstoff- und Brennstoffzellenforschung beheben; *Mangelnde Beteiligung der Privatindustrie und ungenügende Umsetzung in Prototypen sowie zielgruppengerechte Information und Ausbau der Finanzierungsmöglichkeiten.
5. Die Programme sind die Schnittstelle zwischen Forschung und Politik. Sie verfolgen die Energiepolitik und sorgen dafür, dass die politischen Rahmenbedingungen mit den Möglichkeiten der Technologien abgestimmt werden.

Das vorliegende Detail-Konzept zeigt hierzu zusammenfassend die weltweite und nationale Ausgangslage (Kapitel 2) sowie die Akteure (Kapitel 3) mit ihrer internationalen Vernetzung (Kapitel 4). Darauf aufbauend werden die technischen und wirtschaftlichen Zielsetzungen (Kapitel 5) und die potentiell vorhandenen Mittel zu deren Umsetzung erläutert. Abschliessend werden die Forschungsschwerpunke, wie sie durch die Energieforschungskonferenz 2007 gutgeheissen wurden (Kapitel 7) und die unterstützenden Programmziele, wie sie sich aus der Analyse anhand der Core Grundsätze ergeben, aufgezeigt.

Die Strategie des BFE-Programms Wasserstoff und Brennstoffzellen ist so ausgerichtet, dass es die Kompetenzen und Aktivitäten der Akteure optimal einsetzt und wo möglich ausbaut, um die Wirkung der Forschung im Sinn der Ziele des Konzepts der Energieforschung des Bundes 2008-2011 zu optimieren. Angemerkt sei, dass ein intensiver Austausch mit den Akteuren hierbei sehr wichtig ist. Aus diesem Grund ist auch geplant für die Programme Wasserstoff und Brennstoffzellen je eine Begleitgruppe zu bilden, in der die wichtigsten Akteure ihre Anliegen einbringen können.

2. Ausgangslage – Weltweite und Schweizer Potentiale und Märkte

2.1 TECHNOLOGIE STATUS

Den „Energy Technology Essentials" (ETE) der Internationalen Energieagentur IEA folgend, kann der Stand der Wasserstoff- [9] wie auch der Brennstoffzellentechnologien [10] wie folgt zusammengefasst werden:

Wasserstoff

Produktion: Der Energieträger Wasserstoff kann äusserst vielfälltig hergestellt und effizient eingesetzt werden, vor allem via Brennstoffzellen für die Stromproduktion und die Mobilität. Erdgas und Kohle sind weltweit weiterhin die kostengünstigsten Quellen für die grossmassstäbliche Wasserstoffproduktion. Das dabei produzierte CO_2 sollte zwecks Emissionsminderung jedoch abgeschieden und sequestiert werden (siehe: IEA-ETE-01; carbon capture and storage – CCS). Im Gegensatz dazu generiert die Wasserstoffproduktion aus erneuerbaren und nuklearen Energiequellen nur minime CO_2-Emissionen. Es sind jedoch weitere Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen notwendig, um konkurrenzfähig zu werden. Obwohl die Wasserstoffproduktionskosten höher sind als bei zentraler Grossproduktion, birgt die dezentrale Wasserstoffproduktion die grössten Markteinsteigermöglichkeiten, da meist auf die Investition in zusätzliche Verteilinfrastruktur verzichtet werden kann. Die heutigen Kosten der dezentralen Wasserstoffproduktion liegen typischerweise über 50 US$/GJ-$H_2$. Die IEA erwartet, dass die Kosten der grossmassstäblichen, zentralen Wasserstoffproduktion aus fossilen Energieträgern in den kommenden Dekaden dank technologischem Fortschritt bis auf 10-15 US$/GJ-$H_2$ gesenkt werden können, inklusive CCS. Zum Vergleich: Ein Rohölpreis von 100 US$/barrel entspricht zirka 17 US$/GJ.

Verteilung: Die niedrige volumetrische Dichte von Wasserstoff (0.0899 kg/Nm^3) führt dazu, dass die Verteilung von gasförmigem Wasserstoff verhältnismässig aufwändig und energieintensiv ist. Die Infrastrukturkosten wie auch die Pumpkosten von Wasserstoffgasnetzen sind grösser als beim Erdgas. Die reinen Distributionskosten von grossen Wasserstoffgasnetzen belaufen sich auf zirka 1.2 US$/GJ-$H_2$. Im Vergleich dazu sind die Distributionskosten beim Flüssigwasserstoff aufgrund der energieintensiven Verflüssigungsverfahren (bei –253°C) signifikant teurer, typischerweise 7-10 US$/GJ-$H_2$. Wasserstofftankstellen verursachen je nach Art und Grösse zusätzliche Kosten von circa 3-9 US$/GJ-$H_2$.

Speicherung: Die Wasserstoffspeicherung im Mobilitätsbereich stellt die grösste F+E Herausforderungen dar (siehe Brennstoffzellen Status). Obwohl Druckgas- (300–700 bar) und Flüssiggass-Speicherlösungen (–253°C) weltweit kommerziell erhältlich sind, können Kompaktheit, Reichweite und Kosten die Erwartungen im Verkehrsbereich noch nicht erfüllen. Der Energieaufwand für die Speicherbefüllung von Druckgas- und Flüssiggasbehältern beträgt circa 12% respektive 35% des Brennwertes des gespeicherten Wasserstoffgases. Tankkosten belaufen sich typischerweise auf zirka 1'000–4'000 US$pro Personenwagen. Im Vergleich dazu verspricht die alternative Wasserstoffspeicherung mittels Metall-Hydriden grosse Verbesserungen. Dies bedingt jedoch noch einen erheblichen F+E Aufwand.

Infrastruktur: Der Investitionsbedarf zur Errichtung einer weltweiten Wasserstoffinfrastruktur für den Mobilitätssektor wird auf mehrere Hundert Milliarden US$ geschätzt (100-1000 Milliarden US$für Gasnetze und 200-700 Milliarden US $ für Tankstellen). Solche Infrastrukturausgaben können heute jedoch noch nicht gerechtfertigt werden, da viele Schlüsseltechnologien einer Wasserstoffwirtschaft noch in der Entwicklung stecken.

Herausforderungen: Zusätzlich zu den rein wirtschaftlichen Herausforderung einer flächendeckenden Einführung von Wasserstoff als zukünftiger CO_2-freier Brennstoff (Stromerzeugung) und Treibstoff (Mobilität) bestehen vielfältige technische, soziale, ökologische und politische Herausforderungen. Weil die imminente Endlichkeit der konventionellen Treibstoffe bevorsteht, wird dem Mobilitätssekter eine Schlüsselrolle für die Wasserstoffwirtschaft zugesprochen. Unsicherheiten bestehen dabei jedoch insbesondere betreffend Ersatzmöglichkeiten wie alternative Treibstoffe (biofuels) und batterie-betriebene Mobilität. Da der immense Bedarf an sauberer und nachhaltiger Mobilität kaum durch eine einzige Lösung gedeckt werden kann, wird erwartet, dass sich verschiedene Lösungen je nach regionalen Vorteilen herausbilden werden.

Brennstoffzellen

Brennstoffzellentypen: Als elektrochemische Wandler verbinden Brennstoffzellen Wasserstoffgas (oder Wasserstoffmischgase) mit Sauerstoff (aus der Luft) und generieren dabei Strom und Wärme. Die Fachwelt unterscheidet Brennstoffzellentypen in sechs Untergruppen. Proton Exchange Membrane oder Polymer Electrolyte Membrane Brennstoffzellen (**PEFC**; 0–80°C) werden vornehmlich für die dezentrale Stromproduktion und im Mobilitätsbereich eingesetzt. PEFC arbeiten mit einer elektrochemischen Umwandlungseffizienz von 35–40%, müssen aber mit hochreinem Wasserstoff betrieben werden, da insbesondere Schwefel und CO die Membranen inaktivieren oder gar zerstören. Festoxid-Brennstoffzellen (**SOFC**; 800–1000°C), Schmelzkarbonat-Brennstoffzellen (**MCFC**; 650°C), phosphorsaure Brennstoffzellen (**PAFC**; 130–220°C) und alkalische Brennstoffzellen (**AFC**; 60–90°C) werden vornehmlich für die stationäre Ko-Produktion von Strom und Wärme eingesetzt. Die Hochtemperaturwandler MCFC und SOFC werden oft mit Erdgas betrieben und verfügen über eine interen Erdgasreformation zu Synthesegas (Mischung aus H_2, CO und CO_2). SOFC ermöglichen höchste elektrochemische Umwandlungseffizienzen von 44–50%, im Wärme-Kraft-Koppelungsbetrieb gar bis 80%. Die Direkt-Methanol-Brennstoffzellen (**DMFC**; 60–130°C) werden dank des einfach transportierbaren Brennstoffs Methanol favorisiert als idealer Batterieersatz. Elektrochemische Umwandlungseffizienzen von DMFC liegen zwischen 15–30%. Die Forschungsanstrengungen bei Brennstoffzellen sind insbesondere auf Umwandlungswirkungsgrad und Lebensdauer fokussiert. PEFC im Mobilitätssektor erreichen heute eine typische Lebensdauer von zirka 2000 Stunden, was einer mittleren Fahrdistanz von etwa 100'000 km entspricht. In Stationäranwendungen hingegen sind schon Betriebszeiten von bis über 30'000 Stunden ausgewiesen worden. Demgegenüber liegt die typischen Lebensdauer von SOFC Brennstoffzellen bei zirka 6’000–8’000 Stunden, mit Zielenwerten bei 40’000–60’000 Stunden.

Marktsituation: PEFC dominieren den Mobilitätsbereich (100%) wie auch den kleinen Leistungsbereich (Watt bis wenige Kilowatt) von Stationäranwendungen (70–80%). Ferner wird erwartet, dass MCFC (75–80%) und SOFC (15–20%) weiterhin den Markt bei grossen stationären Stromproduktionsanwendungen (kW bis MW) dominieren werden. Der globale Markt von Brennstoffzellensystemen beträgt heute meherere Tausend Einheiten pro Jahr, mit einem Anteil von zirka 80% für stationäre und portable Anwendungen und 20% im Mobilitätsbereich.

Kosten: Heutige Stack-Preise von PEFC-Einheiten liegen bei etwa 1'800 US$/kW. Ein starker Trend zur Kostensenkung ist jedoch aufgrund der Modularität feststellbar. Es wird erwartet, dass eine Kostenreduktion auf zirka 100 US$/kW dank Massenproduktion und Erfahrung möglich ist. Falls die die Kosten für Stacks auf 37-75 US$/kW und für Zusatzkomponenten (Speicherung, Elektroantrieb) generell reduziert werden können, darf bis 2030 erwartet werden, dass die Antriebskosten von Wasserstofffahrzeugen etwa 2'200–7'500 US$ betragen werden. Dem liegt die Annahme einer Kostenreduktion von 15–22% pro Verdoppelung der Jahresproduktion zugrunde. Die Investitionskosten von MCFC und SOFC Brennstoffzellensystemen im Leistungsbereich von 200–3000 kW liegen heute bei zirka 12'000 US$/kW.

Speicherung: Die Wasserstoffspeicherung generell und für mobile Anwendungen im Speziellen bleibt weiterhin eine der Hauptherausforderungen. Kompaktheit, Reichweite und Kosten sind klare Schwachpunkte. Druckgas- (300–700 bar) wie auch Flüssiggass-Speicherlösungen (–253°C) sind zwar kommerziell verfügbar aber weiterhin zu teuer. Feststoffspeicher mit Metall-Hydriden versprechen weiterhin erhebliche Fortschritte, benötigen jedoch grossen F+E Aufwand.

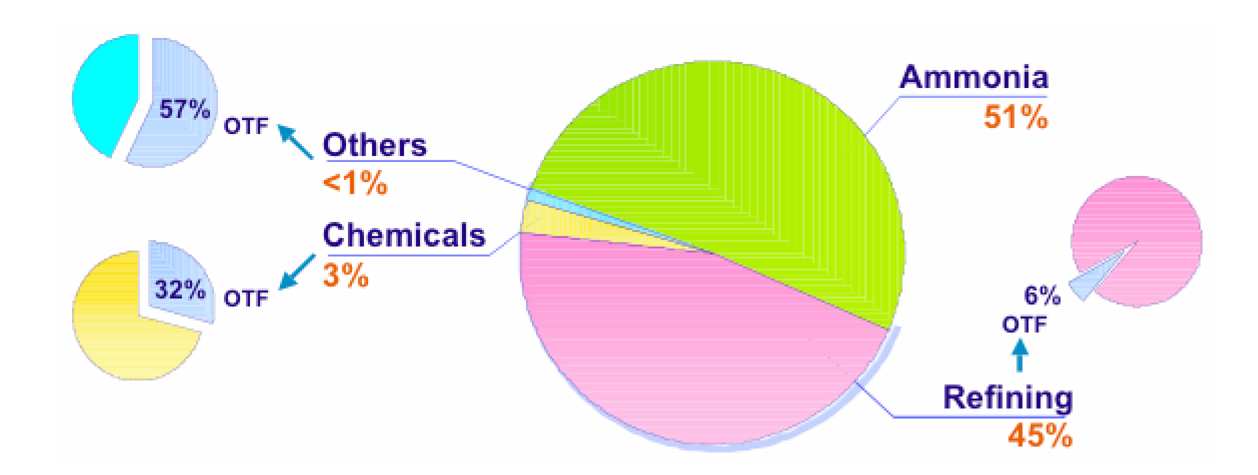
2.2 AKTUELLER EINSATZ VON WASSERSTOFF UND BRENNSTOFFZELLEN WELTWEIT

Wasserstoff

Die weltweite, kumulative Wasserstoffproduktion des Jahres 2004 betrug über 62 Millionen Tonnen (oder 690 Milliarden Normalkubikmeter). Dies entspricht einem erstaunlich grossen Energieäquivalent von 4.3% der Weltjahreserdölproduktion. Dabei bilden die Düngemittelproduktion sowie die Rafinierubng von Erdöl die heute dominanten Einsatzgebiete von Wasserstoff. Dieser wird jedoch hauptsächlich am Produktionsstandort selbst eingesetzt (siehe Figur 2.1).

Wasserstoff wird heute zu beinahe 96% aus fossilen Brennstoffen (49% Erdgas, 29% flüssige Kohlenwasserstoffe, 18% Kohle) und die restlichen 4% durch Wasserelektrolyse oder als Nebenprodukt der Chemikalienindustrie hergestellt. Die OTF Wasserstoffmengen werden vornehmlich durch die vier verbliebenen global führenden Industriegasfirmen vermarktet (*Linde, Air Liquide, Air Products* und *Praxair*). Dies geschieht in Form von Druckgas (Flaschengas und regionale Gasleitungsnetze) und als Flüssigwasserstoff (Cryotank-LKW).

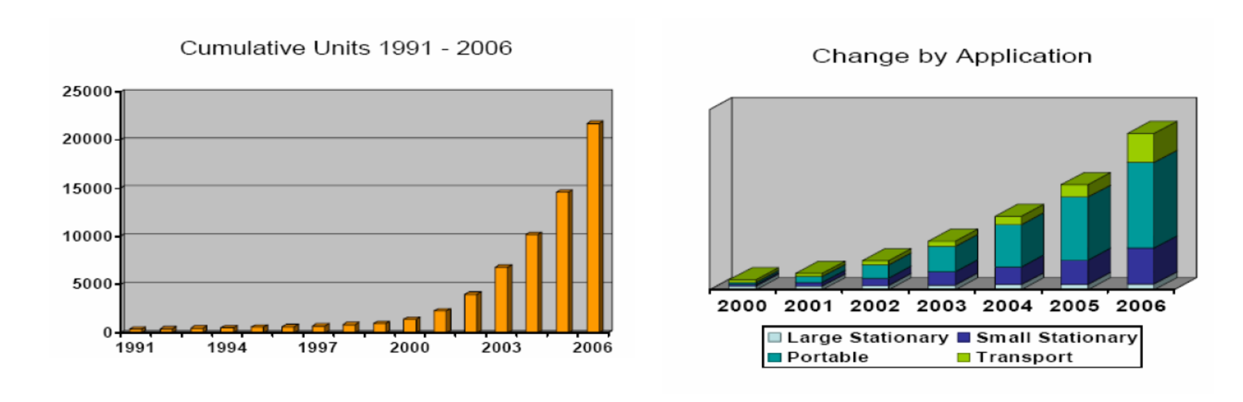
Die weltweite Wasserstoffindustrie erwirtschaftet heute einen kumulativen Umsatz von zirka 140 Mia. US$. Das energierelevante Wasserstoffgeschäft liegt dabei in der Grössenordnung von schätzungsweise circa 0.25% des Weltumsatzes.



__Figur 2.1:__ Prozentuale Verteilung der weltweiten Wasserstoffproduktion; OTF: Verkauf „over the fence" [Quelle: Air Liquide]

Brennstoffzellen

Besonders in den USA, Japan und in Europa laufen intensivierte Forschungsanstrengungen im Brennstoffzellenbereich, wodurch sich bereits ein kleiner Markt für Brennstoffzellen herausgebildet hat. (siehe Figur 2.2).



__Figur 2.2:__ Brennstoffzellenverkäufe und Aufteilung der Verkäufe auf verschiedene Anwendungen [10]

Ausser bei der Anwendung der Brennstoffzelle im militärischen Bereich, z.B. in einem U-Boot der deutschen Marine, sind die meisten Brennstoffzellen in Pilot- und Demonstrationsanwendungen, oder in Feldtests im Einsatz und werden intensiv betreut. Eine gute Übersicht und Auswertung der Leistungsfähigkeit verschiedener Pilot- und Demonstrationsanlagen hat die IEA im Wasserstoff Implementing Agreement zusammengestellt (siehe www.ieahia.org).

2.3 AKTUELLER EINSATZ VON WASSERSTOFF UND BRENNSTOFFZELLEN IN DER SCHWEIZ

Aufgrund der vorhandenen Grundlagenkompetenzen im Forschungs- aber auch im Industriesektor sowie der erkannten, entwicklungsfähigen technischen Vorteile haben sich in der Schweiz folgende technologischen Hauptstossrichtungen herausgebildet (siehe Figur 2.3):

Wasserstoff: Produktion - Hochdruck-Elektolyse, photokatalytische-Elektrolyse, Metalloxid-Zyklus
Speicherung - Metallhydride

Brennstoffzelle: PEFC für portable und mobile Anwendungen
SOFC für stationäre und Micro-Anwendung (WKK, Batterieersatz)

Wie in Kapitel 3 detailliert aufgeführt, verfügt die Schweiz über folgende Hauptakteure:

- Im Bereich Wasserstoff: ca. 24 industrielle und universitäre Hauptakteure verteilt auf die 6 Segmente: Handel (3), Dampfreformation (1), Wasser-Elektrolyse (3), Speicherung (4), Engineering (8), Forschung (5).
- Im Bereich Brennstoffzellen: ca. 24 industrielle und universitäre Hauptakteure verteilt auf die 6 Segmente: PEFC Forschung (7), PEFC Industrie (3), SOFC Forschung (6), SOFC Industrie (3), Gesamtsysteme (3) und Andere (2).



Figur 2.3: Überblick über die wichtigsten Pilot und Demonstrationsprojekte in der Schweiz im Wasserstoff- (rot) und Brennstoffzellen-Bereich (grün)

Mit abnehmender Marktnähe der Systeme sind in der Schweiz gegenwärtig folgende Anwendungen im Einsatz:

Heute bereits **erfolgreich im Markt** sind die Hochdruck-Elektrolyseure der Firma IHT in Monthey. Aufgrund der Nachfrage nach Wasserstoff für nicht-energetische Anwendungen werden die Anlagen von IHT erfolgreich in alle Welt exportiert. Für die Produktion von Industrie-Diamanten betreibt IHT zudem eigene Anlagen. In einem Projekt im Rahmen der IEA lässt IHT einen ihrer Elektrolyseure im Bereich von 2 MW in Verbindung mit einer Windturbine testen.

In **Feldtests** sind die WKK-Galileo-Systeme von Hexis im Einsatz. Aufgrund der Erfahrungen mit den im Contracting betriebenen Anlagen wird gegenwärtig insbesondere die Lebensdauer des Stack optimiert. Wegen den besseren Rahmenbedingungen orientiert sich Hexis in Richtung Deutschland. Im Verkauf von SOFC-Stacks für unterschiedliche Anwendungen ist die Firma Htceramix aktiv. Diese Firma ist im Jahr 2007 eine Partnerschaft mit der in Italien ansässigen SOFC-Power eingegangen. Die FH Luzern betreibt eine Kombination von PEFC und Supercaps für die unterbruchsfreie Stromversorgung einer Mobilfunkantenne im Feldtest. Sollten die Tests erfolgreich sein, interessieren sich die Swisscom und die im Projekt *Polycom* vereinten Rettungs- und Grenzwachdienste sowie das Militär für dieses System.

Anwendungen, sie sich nahe an der **Markteinführung** befinden und aus diesem Grund Hauptsächlich von der KTI, respektive von privaten Partnern finanziert werden sind die von der Firma CEKA, dem PSI und der FH Biel entwickelte portable Brennstoffzelle *IHPos* (500 $W_{el.}$), die vom *Onebat*-Konsortium entwickelte SOFC-Mikro-Brennstoffzelle und die in Zusammenarbeit zwischen MES-DEA und Aprilia entwickelten Elektro-Scooter *Hyscoot*. Hervorzuheben ist die Zusammenarbeit von PSI und Michelin bei der Realisierung des auf den Brennstoffzellenantrieb optimierten Fahrzeugs *Hy-Light*, die international ein beachtliches Echo auslöste. Bis wann diese Anwendung im Markt eingeführt wird ist allerdings noch nicht geklärt

Pilotanlagen sind die von der FH Biel entwickelten Systeme: (a) SAM light, ein Brennstoffzellen getriebenen Elektrofahrzeug und (b) der PEFC-Trailer, eine mobile Stromversorgung. Die FH Yverdon hat das auf den Elektroantrieb optimierte und mit einer PEFC betriebenen Boot Hydroxy 3000 entwikkelt. Das Pilot-Projekt, welches in der Periode 2004 – 2007 für viel internationale Aufsehen gesorgt hat ist der PAC-Car II der von der ETH Zürich zusammen mit anderen Hochschulpartnern sowie Partnern aus der Privatwirtschaft entwickelt wurde. Dieses Fahrzeug hat am Shell Eco Marathon 2005 einen Weltrekord aufgestellt und wurde an verschiedenen Anlässen, u.a. an der Fuel Cell Expo in Japan vorgeführt.

Beurteilung und Ziele für Anwendungen in der Schweiz: Gemessen an den Kompetenzen von Forschung und Industrie ist die Anwendungsdichte in der Schweiz noch klein und soll daher in der Periode 2008 – 2011 verbessert werden.

2.4 POTENZIALE WELTWEIT, IN EUROPA UND IN DER SCHWEIZ

Die Abschätzung der Potentiale im Zusammenhang mit der Anwendung von Wasserstoff als Energieträger und Brennstoffzellen als effiziente Umwandlungstechnologie muss im internationalen Zusammenhang betrachtet werden. Bisher ist der Markt international noch wenig differenziert, ausser bei der nicht-energetischen Anwendung von Wasserstoff (siehe Kapitel 2.2). Im Energiebereich orientieren sich die Projektionen des zukünftigen Markts und der Potentiale für (a) die rationelle Umwandlung, (b) die Integration erneuerbarer Energien und (c) die Senkung von CO_2-Emissionen an den Szenarien der Internationalen Energie Agentur IEA [8] sowie an der Europäischen Vision der Technologieplattform Wasserstoff und Brennstoffzellen [3] und am Implementation Plan für das Jahr 2020 [7].

Die **IEA** hat basierend auf einem Markal-Modell Szenarien zur Integration von Wasserstoff und Brennstoffzellen in den Markt gerechnet [8]. Die wichtigsten Treiber der Szenarien sind (a) Versorgungssicherheit, (b) technischer Fortschritt, (c) wirtschaftliche Rahmenbedingungen und (d) die Verfügbarkeit alternativer Technologien. Zusammengefasst kommt die IEA zu folgenden Schlüssen:

- Wasserstoff findet nur dann Eingang in den Markt, wenn bei den zentralen Treibern günstige Rahmenbedingungen geschaffen werden. Findet dies nicht statt, werden Wasserstoff und Brennstoffzellen nicht die kritische Masse für einen erfolgreichen Markteintritt erreichen. Durch die Marktbarrieren würden in diesem Fall Konkurrenztechnologien bevorzugt.
- In den optimistischen Szenarien ist das Marktpotential vor allem in den OECD-Ländern und in China vorhanden. In allen Regionen dominiert die Anwendung in Fahrzeugen den Wasserstoffmarkt. Von den OECD-Regionen wurde im optimistischsten Szenario bis 2050 ein Brennstoffzellen-Fahrzeug-Anteil von 10% in Australien, 22% in Japan, 35% in Kanada, 36-48% in Europa und 42% in den USA errechnet. Die Verwendung von Wasserstoff im Verkehrsbereich wird in Europa und den USA ab 2020 und in den übrigen Regionen ab 2025 erwartet.
- Im Vergleich zwischen dem optimistischen Szenario und dem Referenz-Szenario erbringt die Wasserstoff-Anwendung eine CO_2-Reduktion von 5% (1.4 Gt CO_2) und eine Reduktion von 2% des Ölverbrauchs (hängt mit der Annahme zusammen, dass Wasserstoff vorerst v.a. aus Öl, Kohle und Gas gewonnen wird). Dem geringen Effekt wird der Vorteil eines diversifizierten Systems entgegengestellt, mit dem die Stabilisierung der CO_2-Emissionen erreicht werden soll.
- Wenn Wasserstoff als Technologie-Option unterbunden wird, tendiert der Verkehrsbereich zu Ethanol-Fahrzeugen (10%), fortschrittlichen Motorfahrzeugen (20% aufgeteilt auf Benzinmotoren, Benzinhybrid, Gasmotoren).
- Stationäre Brennstoffzellen finden Anwendung v.a. im Gebäude-, Handels- und Industriesektor und füllen die Lücke zwischen kleinen Boilern und grossen WKK-Zentralen. In allen Szenarien erreichen die stationären Brennstoffzellen eine Gesamtkapazität von 200-300 GW bis 2050 (ent-

spricht 2-3% der installierten Kapazität). Dies kommt daher, dass MCFC und SOFC als stabile Technologien angesehen werden und somit kaum von Politik- und anderen Strategien abhängen. PEFC können sich bei stationären Systemen nicht etablieren, da sie eine kostenintensive Wasserstoff-Infrastruktur und einen externen Reformer benötigen, eine tiefere Konversionsrate aufweisen und anfällig auf irreversible Schädigungen sind.

- In kostenoptimierten Szenarien wird Wasserstoff zunächst durch dezentrale Reformierung von Erdgas und Elektrolyse gewonnen und erst zu einem späteren Zeitpunkt durch zentrale Konversion von Kohle und Erdgas mit CO_2-Abtrennung und Speicherung. Wasserstoff aus erneuerbaren und aus Kernenergie spielt in den Szenarien keine signifikante Rolle, obwohl diese Technologien nur leicht teurer sind als die vorher genannten. Diese Produktionsart hat nur dann eine Chance, wenn die Kosten nicht der zentrale Aspekt sind, oder falls keine geeigneten CO_2-Abtrennungs- und CO_2-Speicherungstechnologien zur Verfügung stehen.

Die Vision der **EU-Technologieplattform Wasserstoff und Brennstoffzellen HFC** [3] nennt als wichtigste Gründe für den Einsatz von Wasserstoff und Brennstoffzellen (a) die Versorgungssicherheit, (b) die wirtschaftliche Wettbewerbsfähigkeit, (c) Verbesserung der Luftqualität und der Gesundheit der Bevölkerung und (d) Verminderung des Klima-Effekts. Im Implementation Plan IP von 2007, werden die Zwischenziele bis 2020 auf dem Weg zur Wasserstoffwirtschaft konkretisiert. Die Marktziele des Implementation Plan sind in Tabelle 2.1 detailliert zusammengefasst, inklusive der dafür benötigten Mengen Wasserstoff. Die Mittel, welche zur Realisierung dieser Einstiegsmärkte benötigt werden, belaufen sich auf 7.4 Mia€ für die Periode 2007 – 2015. Inwiefern der politische Willen umgesetzt wird, um diese ehrgeizigen Ziele zu realisieren, wird sich zeigen, wenn die Europäische Kommission EC über die "Joint Technology Initiative Brennstoffzellen und Wasserstoff JTI FCH" entscheidet. Dies wird Mitte 2008 erwartet. Die JTI FCH ist zur Zeit mit 450 Mio€ EC Funding dotiert, was nicht ganz den ursprünglichen Erwartungen entspricht.

	Portable FCs for handheld electronic devices	Portable Generators & Early Markets	Stationary FCs Combined Heat and Power (CHP)	Road Transport
EU H_2/FC units sold per year projection 2020	~ 250 million	~ 100’000 p.y. (~ 1 GW_e)	100’000 to 200’000 per year (2-4 GW_e)	0.4 to 1.8 million
EU cumulative sales projections until 2020	n.a.	~ 600’000 (~ 6 GW_e)	400’000 to 800’000 (8-16 GW_e)	1-5 million
EU Expected 2020 Market Status	Established	Established	Growth	Mass market roll-out
Average power FC system	15 W	10 kW	<100 kW (Micro HP) >100 kW (industrial CHP)	80 kW
FC system cost target	1-2 EUR/W	500 EUR/kW	2000 EUR/kW (Micro) 1000-1500 EUR/kW (industrial CHP)	<100 EUR/kW (for 150’000 units per year)
Application			**Hydrogen Demand (ton)**	
			Low Scenario	High Scenario
Road Transport			58’500	750’000
Portable Generators			720’000	1’150’000
Portable Micro Fuel Cells			82’000	620’000
Total			860’500	2’520’000

Tabelle 2.1: *Ziele, welche die EU mit bis 2020 erreichen will, zusammengefasst im Snapshot 2020, inklusive die Mengen Wasserstoff, welche für den Betrieb der Anwendungen bereitgestellt werden müssen; 1 kg Wasserstoff entspricht 120 MJ, resp. 33.33 kWh, resp. 2.75 kg Benzin.*

Die **Potentiale in der Schweiz** im Zusammenhang mit Wasserstoff und Brennstoffzellen liegen in erster Linie bei der Bereitstellung der Technologien für den internationalen Markt. Sowohl die Wasser-

stoff-, als auch die Brennstoffzellentechnologien sind komplexe Hochtechnologien mit hohen Ansprüchen an die Systemintegration. Für deren Entwicklung sind herausragende Kompetenzen im Bereich Materialien, Nanotechnologie, Analytik, Prozessanalyse/Modellierung und Systemdesign notwendig, in denen die Schweiz sowohl von Seiten der Forschung als auch der exportierenden Unternehmen traditionell stark ist.

Bei der Anwendung der **Wasserstofftechnologien** in der Schweiz ist die Herkunft von Wasserstoff von entscheidender Bedeutung. Falls Wasserstoff im Mobilitätsbereich als Energievektor breit eingeführt wird, werden grosse Mengen Wasserstoff benötigt, die zum grössten Teil importiert werden müssen. Möglichkeiten einer einheimischen Produktion bestehen insbesondere bei:

1. Hochdruckelektrolyse gekoppelt mit Wasserkraft
2. Nuklearer Hochtemperatur-Elektrolyse
3. Biogas und Vergasung von Biomasse
4. Photoelektrokatalyse

Bei allen Optionen ausser bei der vierten wird Wasserstoff über einen Zwischenschritt produziert (Strom, Biogas, Syngas), was bedeutet, dass die direkte Verwertung der Zwischenprodukte energetisch sinnvoller und je nach Versorgungslage auch wirtschaftlicher sein kann. Die CORE-Roadmap geht davon aus, dass Wasserkraft für die reinen Elektrizitätsanwendungen und Biomasse aufgrund seiner guten Speicherbarkeit direkt in den Sektoren Raumheizung/Warmwasser, industrielle Prozesse und Verkehr eingesetzt werden. Diese beiden Varianten fallen für die Wasserstoffproduktion vorerst ausser Betracht. Hingegen bestehen bei der Wahl der Kernenergie als Option für die Elektrizitätsversorgung, insbesondere mittels Hochtemperatur-Reaktoren der Generation IV, und durch freie Potentiale bei Gebäude-integrierter Sonnenenergienutzung durch Photoelektrokatalyse Möglichkeiten einer einheimischen Wasserstoffproduktion. Unter der Annahme, dass die Beiträge der Kernenergie bis 2050 auf dem Stand des Jahres 2001 verbleiben ergibt die CORE-Roadmap folgende Potentiale:

- Gebäude integrierte photokatalytische Elektrolyse: 11.3 PJ. Dies entspricht 6% des projektierten Schweizer Wasserstoff-Verbrauchs im Verkehrsbereich im Jahr 2050.
- Nukleare getriebene Hochtemperatur-Elektrolyse: 73.6 PJ. Dies entspricht 37% des projektierten Schweizer Wasserstoff-Verbrauchs im Verkehrsbereich im Jahr 2050.

Bei der Anwendung der **Brennstoffzellentechnologien** liegen die grössten Potentiale im Verkehrsbereich und bei stationären WKK-Systemen. Die portablen Brennstoffzellen, welche im Implementation Plan der EU aufgeführt werden, sind ein wichtiger Einstiegsmarkt, werden aber später nur einen kleinen Teil der energetischen Anwendungen ausmachen. Für den Verkehrsbereich hat die CORE bis 2050 das Ziel formuliert den Flottenverbrauch von Personenwagen auf 3 L pro 100 km zu senken. Mit dem Fahrzeug *HyLight* haben das PSI und Michelin demonstriert, dass ein alltagstaugliches Fahrzeug ohne Komforteinbusse mit einem Benzinäquivalent von 2 L pro 100 km auskommt. Die Verwendung von Brennstoffzellen im Verkehrsbereich geht demnach voll in Richtung des von der CORE formulierten Ziels, falls die Herstellung des Wasserstoff nicht eine wesentliche Menge zusätzlicher fossiler Treibstoffe konsumiert hat. Die stationären WKK-Anlagen können ihre Stärke vor allem dort ausspielen, wo Wärme und Strom verwertet werden können, also im Gebäudebereich und bei der industriellen Prozesswärme. Im Gebäudebereich hat die CORE das Ziel formuliert, bis 2050 ohne fossile Brennstoffe für die Wärmebereitstellung auszukommen. Damit muss die Kombination fossile Brennstoffzelle-Wärmepumpe als Übergangstechnologie angeschaut werden, welche die Senkung des Verbrauchs fossiler Brennstoffe beschleunigt. Aufgrund der langen Re-Investitionszyklen im Gebäudebereich kann davon ausgegangen werden, dass mindestens noch 2 Generationen von fossil betriebenen Brennstoffzellen (40 Jahre) für diese Anwendung in Frage kommen. Mit Biogas betriebene Brennstoffzellen für grosse Gebäude haben auch nach 2050 ihre Berechtigung. Bei der Prozesswärme geht die CORE-Roadmap davon aus, dass der Bedarf an Erdgas bis 2050 steigt, da das primäre Ziel im Ersatz des heute eingesetzten Erdöls liegt. Dies sind ideale Voraussetzungen für den Einsatz von Hochtemperatur-Brennstoffzellen. Zusammengefasst können aufgrund der CORE-Roadmap folgende technischen Potentiale für die Schweiz ausgewiesen werden:

- PEFC für Personenwagen: Mit dem inländischen Wasserstoffpotential kann im Jahr 2050, 43% der Endenergie im Verkehrsbereich abgedeckt werden, was 84 PJ entspricht. Dieser Anteil ist in guter Übereinstimmung mit den Rechnungen der IEA. Mit einer durchschnittlichen Fahrdistanz von 19'000 km im Jahr 2005 [11] könnten rund 5 Mio. Fahrzeuge wie der *HyLight* versorgt werden.
- SOFC für Bereitstellung von Wärme in Gebäuden: Im Jahr 2025 geht die Roadmap davon aus, dass in Bezug zum Jahr 2001 je 30% des in Öl- respektive Erdgasbrennern umgesetzten Brennstoffs durch die Effizienzsteigerungen mittels der Kombination WKK-Wärmepumpe erzielt werden

können, wobei 30% der Anlagen bereits mit Biogas betrieben werden. Im Jahr 2050 werden je 65% des in Öl- respektive Erdgasbrennern umgesetzten Brennstoffs ersetzt sein, wobei alle Anlagen mit Biogas betrieben werden. Im Jahr 2050 werden ca. 16% der Endenergie für Heizung und Warmwasser aus Biomasse WKK-WP erbracht, was 33 PJ entspricht. Diese Zahlen sind als Maximalwerte zu verstehen, da die WKK-Technologien neben Brennstoffzellen auch andere Technologien wie z.B. effiziente Verbrennungsmotoren, oder Mikro-Gasturbinen umfassen werden.

- SOFC und MCFC für die Bereitstellung von Prozesswärme: Aufgrund der Substitution von Erdöl durch Erd- und Biogas resultiert in der CORE-Roadmap ein Anstieg des Erdgasverbrauchs um einen Faktor 2. Rund ¾ des Endenergiebedarfs in diesem Sektor wird bis 2050 durch Erd- und Biogas gedeckt, was 85 PJ entspricht. In diesem Bereich ist zusammen mit dem Berkehrsbereich das grösste technische Potential für die Anwendung von Brennstoffzellen anzusiedeln, wobei Alternativen, wie Motoren und Gasturbinen für diese Anwendung ebenfalls geeignet sind.

Beurteilung und Ziele bezüglich der technischen Potentiale in der Schweiz: Insgesamt können in der Schweiz bis zu 85 PJ Wasserstoff bereitgestellt werden, 13% durch Gebäude integrierte Photoelektrokatalyse und 87% durch nuklear getriebene Hochtemperatur-Elektrolyse. Das Wasserstoff-Potential hängt stark von den Rahmenbedingungen ab und ist aus Sicht der gegenwärtigen Gegebenheiten beurteilt worden. Die grössten Potentiale bei der Anwendung von Brennstoffzellen liegen bei PEFC im Verkehrsbereich (84 PJ) und bei SOFC sowie MCFC für die Bereitstellung von Prozesswärme (85 PJ). Die fossile Anwendung von SOFC im Gebäudebereich (33 PJ) ist als Übergangstechnologie zu sehen, die durch Biogas-SOFC abgelöst wird. Die Brennstoffzellen stehen in starker Konkurrenz zu anderen Technologien und müssen sich über ihre Leistungsfähigkeit und den Preis im Markt behaupten.
Mit der Forschungsschwerpunktsetzung sollen die Potentiale der Schweiz gezielt und Stärken fokussiert eingesetzt und wo möglich ausgebaut werden. Wichtig ist, dass über die internationale Vernetzung und Beteiligung in entsprechenden Projekten die Ressourcen erhöht werden können.

3. Nationale Akteure

Einen Gesamtüberblick über die nationalen Akteure gibt Figur 2.3 in Form einer Landkarte der wichtigsten Vorhaben in der Schweiz im H2 und BZ Bereich. Details bezüglich der Kompetenzen zeigen die nachfolgenden Tabellen 3.1 und 3.2.

In der Schweiz befasst sich die Energieforschung seit über 30 Jahren mit **Wasserstoff** und ist massgebend in internationale F+E Projekte eingebunden. Neben den hohen Kompetenzen in der Forschung sind Schweizer KMUs weltweit mitführend als Originalgerätehersteller im Spezialitätenmarkt der nicht-energierelevanten Wasserstoffanwendungen, insbesondere in den Bereichen Kryotechnik, Diamantveredelung, Elektrolyse, Ammoniakproduktion und Mikroelektronik. Im Detail verfügt die Schweiz Bereich Wasserstoff über folgende in Tabelle 3.1 aufgeführten industriellen und universitären Hauptakteure:

Segment (24)	Fokus: Akteur (Link)	Aktivitäten
Handel (3)	Druckgas: www.carbagas.ch	Produktion, Distribution, Verkauf
	Druckgas: www.pangas.ch	Produktion, Distribution, Verkauf
	Flüssiggas: www.linde-kryotechnik.ch	Produktion, Distribution, Verkauf
Dampfreformation (1)	Erdgas: www.casale.ch	Produkt- & Projektengineering
Wasser-Elektrolyse (3)	Alkali: www.iht.ch	Produkte F+E, Herstellung, Verkauf
	Alkali: www.accagen.com	Produkte F+E, Herstellung, Verkauf
	PEM: www.diamondlite.com	Projektentwicklung, Verkauf
Speicherung (4)	Druckgas: www.djeva.ch	Projektentwicklung, Verkauf
	Flüssiggas: www.linde-kryotechnik.ch	Projektentwicklung, Verkauf
	Flüssiggas: www.contraves.com	Produkt- und Projektentwicklung
	Metallhydrid: www.effcell.com	Projektentwicklung, Verkauf
Engineering (8)	Technologie: www.michelin.ch	Fahrzeugsystemengineering
	Technologie: www.greenfield.ch	Verfahrenstechnik, Kompressoren
	Technologie: www.bieri-ing-ch	Verfahrenstechnik, Wärmetauscher
	Technologie: www.weka-ag.ch	Verfahrenstechnik, Kryoventiltechnik
	Technologie: www.linde-kryotechnik.ch	Verfahrenstechnik, Kryotechnik
	Beratung: www.ocn.ch	Systemkonzeption, Studien
	Beratung: www.sciencesolutions.ch	Studien
	Beratung: www.hydropole.ch	Studien
Forschung (5)	Produktion: www.epfl.ch	Photoelektrolytische Wasserspaltung
	Produktion: www.empa.ch	Elektrolyse & PEC Wasserspaltung
	Produktion: www.psi.ch	Solarthermochemische H_2O-spaltung
	Speicherung: www.empa.ch	Metallhydridspeicherung, Sicherheit
	Speicherung: www.unige.ch	Druckspeicher, Materialien
	Systeme: www.ethz.ch	Systemanalysen

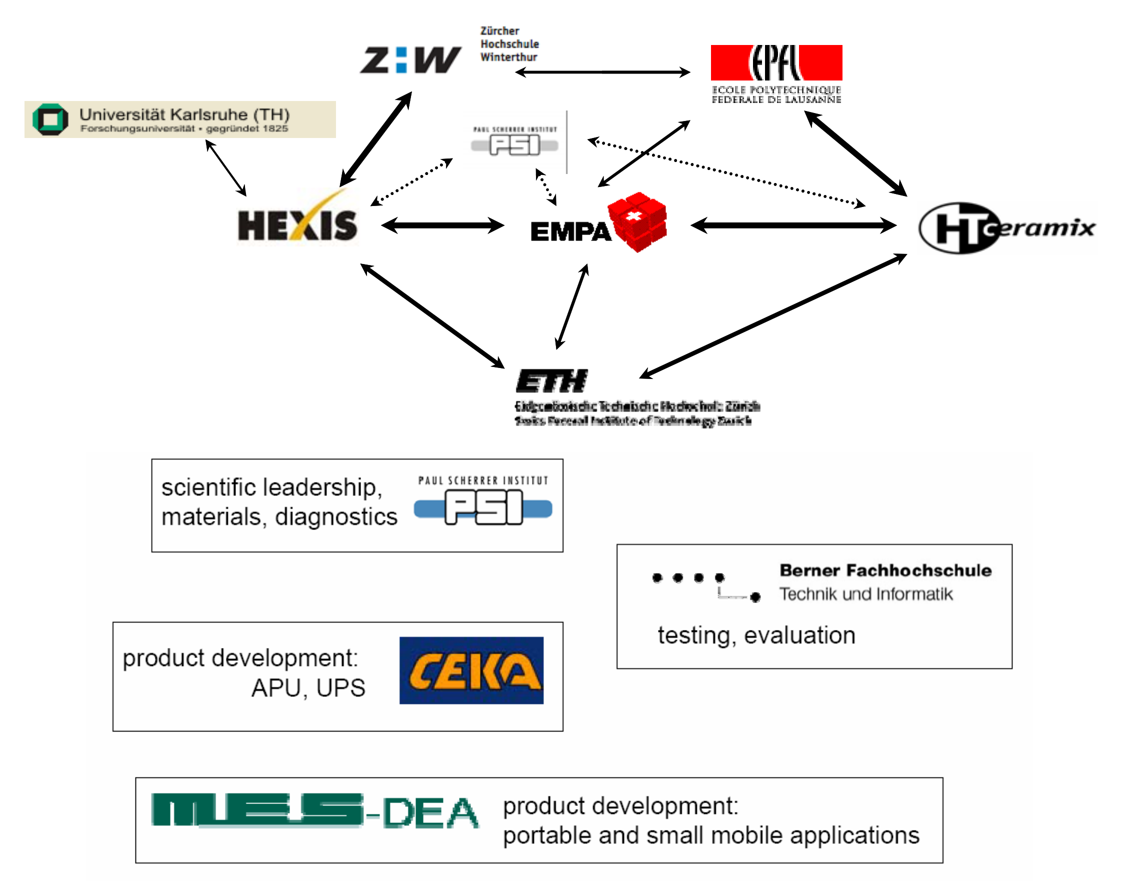
Tabelle 3.1: *Industrielle und universitäre Hauptakteure im Wasserstoffbereich in der Schweiz*

Die **Schweizer Brennstoffzellengemeinschaft** ist kompakt, über die ganze Wertschöpfungskette kompetent, international vernetzt und ihre Stärke in der Forschung und Entwicklung anerkannt. Innerhalb des Forschungs- und Produktentwicklungsfokus der Polymer- (PEFC) sowie der Festoxyd-Technologie (SOFC) sieht sich die Schweizer Industrie als Originalgerätehersteller für Brennstoffzellenanwendungen für Mikro- (Batterieersatz), respektive portable Hilfsstromaggregate (APU), stationäre Hausenergie, unterbruchslose Stromversorgung (USV) und Transportanwendungen (Fahrzeuge, Schiffe). Im Detail verfügt die Schweiz Bereich Brennstoffzellen über folgende in Tabelle 3.2 aufgeführten industriellen und universitären Hauptakteure:

Segment (24)	Akteur (Kommentar), Link	Fokus, Aktivitäten
PEFC Forschung (7)	PSI (Grundlagenforschung, Hauptstakeholder, TT) ENE, ene.web.psi.ch	Materialien, Membranen, Katalysatoren, Electrocatalysts, In situ Diagnostics
	ENE ECL, ecl.web.psi.ch	Stack, System, Prüfstand, Testing, Modelling und Evaluation
	BFH TI Biel, labs.ti.bfh.ch/index.php?id=748	Prüfstand, System Testing, Pilot-Anwendungen, Systeme, Minisysteme, Stacks, Steuerungen
	EIVD HEIG, iese.heig-vd.ch/elec_ener/	Systeme, Anwendungen, H2-Verteilung
	HTA Luzern, www.hta.fhz.ch/institute	System und Anwendungsauslegung und Test
	ZHAW ICP, http://icp.zhaw.ch/	Modelling
	HEV Sion, www.hevs.ch	Systeme mit Wärmepumpen
PEFC Industrie (3) Teilsystem Komponenten	CEKA, www.ceka.ch	Stack Produktion, Portable Systeme Entwicklung und Integration
Systeme Anwendung	MesDea, www.mes-dea.ch	Mobilitäts Anwendungen, Systeme, Stack
Anwender	Swisscom Fixnet	Betrieb von USV-Anlage für GSM-Station
Plus nicht explizit genannte Zulieferer und Anwender, zum Teil auch ausländische Firmen mit Sitz in der CH		Materialien, Membranen, MEA, Komponenten, Testing, Anwendung
SOFC Forschung (6)	EPFL LENI, leni.epfl.ch EPFL LPI, lpi.epfl.ch	Stacks, Prozessintegrationstechnik, Energieflüsse Kosten, Modelling, Testing
	EMPA Dübendorf www.empa.ch/plugin/template/empa/613/*/---/l=1	Anodenmaterial, MEA Nano-Material, Material- und Komponentenentwicklung, mech. und therm. Testing
	ETHZ NMW www.nonmet.mat.ethz.ch/research/onebat	Keramische u Nano-Materialien (Dünnfilm), Micro-Brennstoffzellenentwicklung
	ETHZ LTNT, www.ltnt.ethz.ch	Thermisches Management
	NTB, www.ntb.ch/2635.html	System Design, Auslegung
	ZHAW ICP, http://icp.zhaw.ch/	Modelling
SOFC Industrie (3) Teilsystem Komponenten	HTceramix, www.htceramix.ch	Integrierbare Teilsysteme, Stack, Zellen, Komponenten
Systeme Anwendung	Hexis AG, www.hexis.com	Hausenergieanlage, Entwicklung, Herstellung und Vertrieb
	Fucellco AG, www.fucellco.ch	Zellen, Stack, Systeme
Plus nicht explizit genannte Zulieferer und Anwender, zum Teil auch ausländische Firmen mit Sitz in der CH		Materialien, Membranen, MEA, Komponenten, Testing, Anwendung
Gesamtsysteme (3)	Michelin Schweiz, www.michelin.com	Fahrzeug
	Swatch Group & Groupe E www.swatchgroup.com…	Energiesystem (Mobilität)
	Thoma&Renz	Beratung/Betrieb stationäre Systeme
Andere (2) PAFC	AEB AG (Birsfeld)	Betrieb von stationäre Pilotanlage
MCFC	DaimlerChrysler PowerSystems Schweiz AG	Vertrieb und Beratung

Tabelle 3.2: *Industrielle und universitäre Hauptakteure im Brennstoffzellenbereich in der Schweiz*

Daneben gibt verschiedene weitere Gruppen und Firmen, welche sich subsidiär mit Forschung (Materialien - Systemtechnik) und Umsetzung (Integration – Design – Anwendung) von H2 und BZ Systemen auseinandersetzen oder für die Vernetzung der Stakeholder sich einsetzen z.B. Energie Kompetenz Center (CCEM (PSI), EC (EPFL), ESC (ETHZ), Energie Cluster) und WTT-Stellen der Akademien.



Figur 3.1: *Nationale Konsortien für pre-kompetitive Forschung und Entwicklung oben: SOF-CH unten: PEF-CH*

Neben der hohen Kompetenz über die ganze Wertschöpfungskette ist die hohe Transparenz und die in den letzten 4 Jahren gepflegte, nationale Vernetzung eine grosse Stärke der Schweizer H2 und BZ Szene. In fast allen Bereichen gibt es institutionsübergreifende Projekte (Micro-SOFC Konsortium, SOF-CH, PEF-CH, PEChouse, weitere sind im Aufbau, siehe Figur 3.1). Hierzu haben sich sogar einige der an sich in Konkurrenz stehenden Firmen für gemeinsame Forschungsvorhaben im pre-competitiven Bereich mit den universitären Kompetenzträgern in Konsortien zusammen getan und gemeinsame Roadmaps mit quantifizierten Meilensteinen entwickelt. Die Akademie ihrerseits hat und/oder ist daran die Kompetenzfelder kollaborativ und ergänzend aufzuteilen. Mittelfristig besteht somit das Potential gezielt umfassende Forschungs- und Entwicklungsdienstleistungen anbieten zu können, resp. Anliegen und drängende Fragestellungen der nationalen und internationalen Industrie effizient strukturiert und mit einer überkritischen Masse anzugehen.

Auf dieser Basis wird es künftig noch verbessert möglich sein sich gezielt und aktive in die internationalen Prozesse, Plattformen und Projekte einzubringen z.B. für die optimale Integration der Baugruppen am Ein- und Ausgang der Brennstoffzelle, wo auch weitere heute noch nicht engagierte Kompetenzen involviert werden oder Demoprogramme (siehe Kapitel 4). Ein daraus resultierendes Hauptziel ist der Aufbau und die Beteiligung in Netzwerken von Unternehmen für die wirtschaftliche Umsetzung der Forschungsergebnisse und die Produktrealisierung inkl. Lieferanten von Komponenten und Kunden d.h. über die ganze Wertschöpfungskette.

Beurteilung und Ziele für die nationalen Kompetenzen: In der Schweiz sind in allen F&E Bereichen – Grundlagen, Theorie, Modellierung, Analytik und Machbarkeit – hohe Kompetenzen und ein hoher Stand der Ausbildung vorhanden. Der ganze ETH-Bereich sowie einige Universitäten sind stark involviert und engagiert. Tendenziell mehr im P&D Bereich sind relevante FH-Gruppen aktiv. Die Beteiligung der Industrie ist mit ca. 30 direkt aktiven Firmen vorhanden aber noch stark auszubauen. Hohe Chancen werden in der Schweiz im Bereich der Zulieferindustrie und Originalgerätehersteller gesehen.
Eine grosse Stärke ist die hohe Transparenz, sowie die nationale Vernetzung und Zusammenarbeit. Dies behebt das Manko der zuweilen unterkritischen Ressourcen und wird künftig eine umfassende Forschungs- und Entwicklungsdienstleistung aus quasi einer Hand zu lassen. Darauf aufbauend sind eine aktive Integration in internationale Realisierungsnetzwerke über die ganze Wertschöpfungskette das Ziel.

4. Internationale Zusammenarbeit

Auf globaler Ebene ist die Zusammenarbeit in den Feldern Wasserstoff und Brennstoffzellen in den Programmen (Implementing Agreements) der **Internationalen Energieagentur IEA** *Hydrogen HIA* und *Advanced Fuel Cells AFC* organisiert. Die Zusammenarbeit im Rahmen der IEA dient vor allem dem Zweck, gewisse Aufgaben im sogenannten *Task-Sharing* durchzuführen und dabei die knappen Forschungsmittel auf koordinierte Weise einzusetzen. Dazu gehört ein intensiver Informationsaustausch. Bei grundlegenden Themen beispielsweise der Materialforschung, aber auch bei Aspekten der Markteinführung wie der Definition von Standards herrscht grosser Bedarf nach dieser Form der Zusammenarbeit. Auch erlaubt das Engagement in den Projekten der IEA die Bestimmung der Position der Schweizer Forschung im Vergleich zu den globalen Akteuren und erleichtert die Definition von Zielen, um in der Forschung an vorderster Front zu bleiben. Je näher die Projekte in Richtung Produkte gehen, desto mehr beginnt die Konkurrenz zu spielen und sich die Arbeiten in den privatwirtschaftlichen Rahmen zu verlagern, was zur Wahrung von wirtschaftlichen Interessen zweckmässig ist. Insgesamt nehmen 20 Länder am HIA und 17 Länder am AFC teil. Die aktuellen Forschungsfragen sind in den Tabellen 4.1 und 4.2 aufgeführt, inkl. die Projekte, an denen sich die Schweiz beteiligt:

Projekte im Hydrogen Implementing Agreement (IEA HIA) Task	**teilnehmende Länder**	**Schweizer Vertreter**
18: *Integrated Systems Evaluation* Systemintegration, best practice	16	EMPA Dübendorf
19: *Hydrogen Safety* Erhebung von Risikomodellen, Standardisierung von Testprozeduren, best practice	9	EMPA Dübendorf
20: *Solar Hydrogen Production from Water Electrolysis* Identifizierung und Charakterisierung neuer Materialien, Systemanalyse, Demonstration	10	SPF Rapperswil
21: *Bio Hydrogen* Charakterisierung von Organismen (Algen, Cyanobakterien, etc.), Prozessentwicklung	11	---
22: *Fundamental and Applied Hydrogen Storage Materials Development* Identifizierung und Charakterisierung von Materialien, Systemanalyse für stationäre Anlagen	18	EMPA Dübendorf
23: *Small Scale Reformers* Integration erneuerbare Energiequellen, Harmonisierung von Standards, Best Practice	10	---
24: *Wind Energy & Hydrogen* Systemintegration, Geschäftskonzepte, Best Practice	9	IHT Monthey
25: *High Temperature Hydrogen Production Process (HTP)* Systemintegration, Geschäftskonzepte, Informationsaustausch, Best Practice	9	PSI Villigen

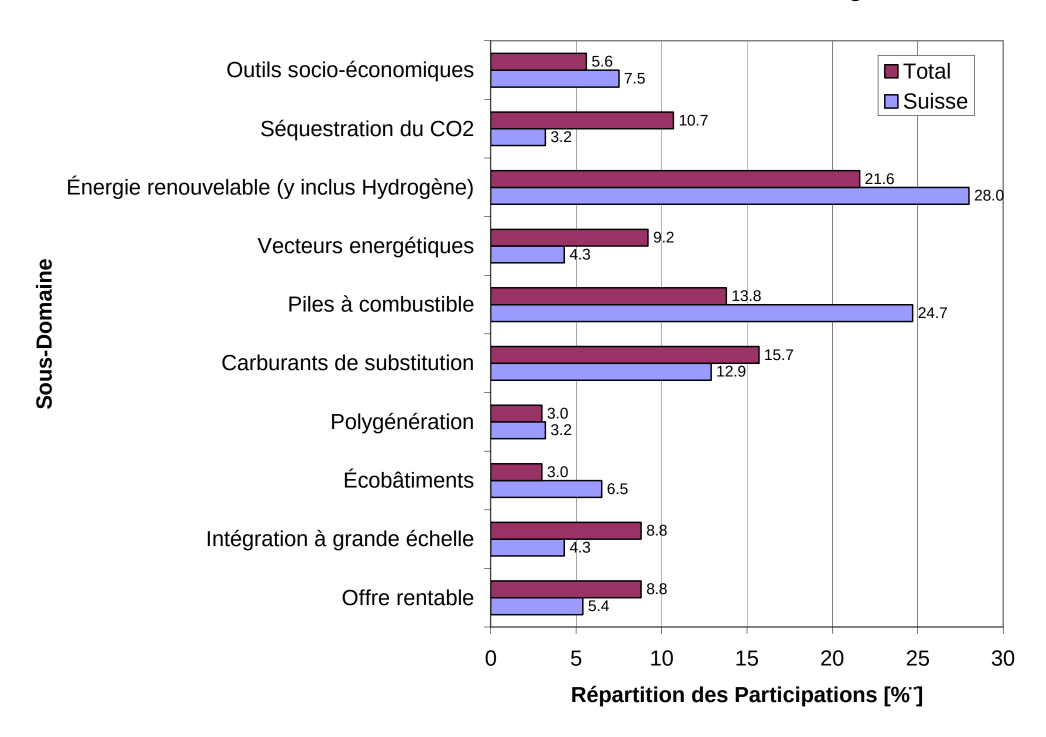
Tabelle 4.1: *Projekte des Hydrogen Implementing Agreement HIA der IEA*

Projekte im AFC Implementing Agreement Annex	**teilnehmende Länder**	**Schweizer Vertreter**
16: *Polymer Electrolyte Fuel Cells* Kostenreduktion und Steigerung der Leistungsfähigkeit	14	---
17: *Molton Carbonate Fuel Cells, towards demonstration* Verbesserung der Leistungsfähigkeit, Kostenreduktion, Entwicklung und Standardisierung von Testprozeduren	5	---
18: *Solid Oxide Fuel Cells, making ready for application* Erhöhung der Lebensdauer und Kostenreduktion	12	Htceramix, Yverdon
19: *Fuel Cells for Stationary Applications* Systemoptimierung, Best Practice	10	Thoma & Renz, Basel
20: *Fuel Cell Systems for Transportation* Systemintegration, Best Practice	6	---
21: *Fuel Cells for Portable Applications* Systemanalyse, Harmonisierung von Standards	9	---

Tabelle 4.2: *Projekte des Advanced Fuel Cell AFC Implementing Agreement der IEA*

Beurteilung und Ziele bezüglich der internationalen Zusammenarbeit: Die internationale Zusammenarbeit im Rahmen der Internationalen Energieagentur ist gut etabliert. Alle Forschungsschwerpunkte sind in diese Form der Zusammenarbeit eingebettet, ausser die Arbeiten auf dem Gebiet der PEFC.
Es ist Ziel diese Zusammenarbeiten zu halten und wo möglich projektspezifisch auszubauen. U.a. sollen mit der Neudefinition des Annex 16 des *AFC Implementing Agreements* Ende 2008 eine Beteiligung des Kompetenzzentrums Paul Scherrer Institut geprüft werden.

Die **europäische Zusammenarbeit** ist fokussiert auf die zwei Initiativen (a) 7. Forschungsrahmenprogramm, inkl. Technologieplattform, respektive *Joint Technology Initiative* und (b) das von den Mitgliedsländern getragene *European Research Area Network ERA-NET HY-CO*. Die Zusammenarbeit im Rahmen des 7. Forschungsrahmenprogramms ist eine bedeutende Quelle für die Finanzierung von Forschungsprojekten. Insgesamt wird bis zum Jahr 2011 eine Steigerung der Mittel von gegenwärtig ca. 15 Mio. Fr. pro Jahr für die Energieforschung in der Schweiz allgemein auf 20 bis 25 Mio. Fr. pro Jahr erwartet. Zudem kann mit einer aktiven Mitarbeit die Technologie-Entwicklung mitgestaltet und die Definition von Standards mitgeprägt werden. Dies bringt schlussendlich auch der Schweizer Industrie Vorteile. Die Projektvergabe ist sehr kompetitiv und aufwändig. Nur qualitativ hoch stehende Projekte kommen für eine Förderung in Frage, wodurch eine starke Beteiligung ein gutes Mass für die Qualität der Forschung darstellt. Oft bildet die Zusammenarbeit im Rahmen der IEA ein gutes Netzwerk für die Bildung eines Konsortiums für eine Projekteingabe. Wie Figur 4.1 zeigt, war die Schweizer Forschung im 6. EU-FRP ausserordentlich erfolgreich in den Bereichen Wasserstoff und Brennstoffzellen. Das ERA-NET Instrument ist dagegen für kleine und/oder marktnahe Projekte geeignet. Der Zusammenschluss von interessierten Mitgliedsländern für die Bearbeitung gut definierter Projekte dient auf der einen Seite der Strukturierung der europäischen Forschung und bildet auf der anderen Seite eine gute Basis für bi- oder multilaterale Abkommen sowohl in der Forschung als später auch im Marktbereich. Im Gegensatz, oder besser in Ergänzung zum 7. europäischen Forschungsrahmenprogramm haben spezifische Fragestellungen der Mitgliedsländer einen hohen Stellenwert. Das ERA-NET rundet die Instrumente der internationalen Zusammenarbeit sehr gut ab.



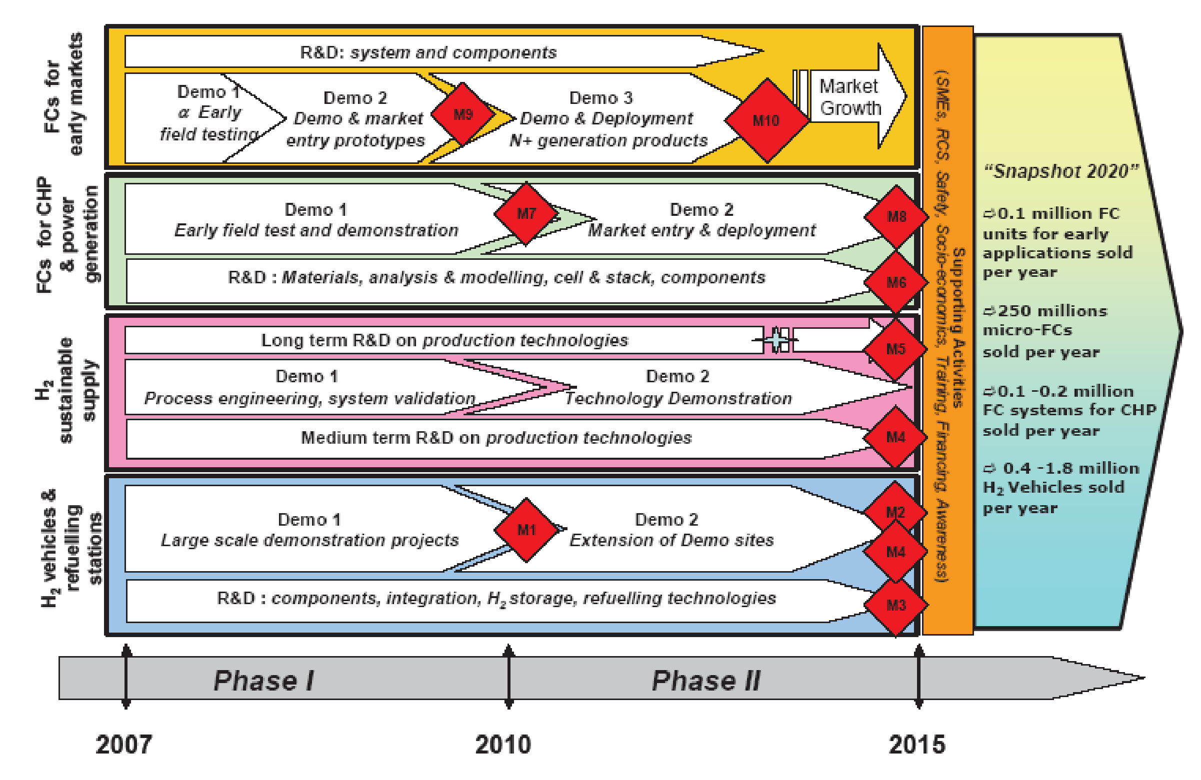
***Figur 4.1:** Beteiligung von Schweizer Forschergruppen an Projekten des 6. EU-Forschungsrahmenprogramms, geordnet nach Kategorien im Energiebereich; Quelle Staatssekretariat für Bildung und Forschung SBF*

Im Rahmen der **Technologieplattform Wasserstoff und Brennstoffzellen** wurden Schlüsseldokumente verfasst, die eine stark steuernde Wirkung auf die Forschung im 7. EU FRP und damit auch auf die Schweiz haben (siehe www.hfpeurope.org). Es handelt sich um:

- Die Vision der High Level Group [3]
- Die Strategic Research Agenda (SRA) [4]

- Das Education & Training Programme [5]
- Die Deployment Strategy (DS) [6]
- Den Implementation Plan (IP) [7]

Im Implementation Plan, der 2007 erschien, werden die Zwischenziele konkretisiert, die bis 2020 erreicht werden sollen, um den ersten Schritt in Richtung einer Wasserstoffwirtschaft zu machen. Die Marktziele wurden verknüpft mit einer strategischen Forschungsagenda einem Aus- und Weiterbildungsprogramm und einer Umsetzungsstrategie, die aufeinander abgestimmt sind. Die Technologien und die Forschungsthemen sind in vier Arbeitspakete (Innovation and Development Action IDA, siehe Figur 4.2) gruppiert worden, in denen bis 2015, also ungefähr bis zum Ende des 7. Forschungsrahmenprogramms, bedeutende Fortschritte zu erzielen sind.



Figur 4.2: *Europäische Roadmap für die Entwicklung und Bereitstellung der H_2&BZ Technologien im Implementation Plan der EU zur Erreichung der Zwischenziele 2020 auf dem Weg zu einer Wasserstoffwirtschaft; Hierfür wurden 4 Arbeitspakete (Innovation and Development Action IDA1-4) und 10 Meilensteine (M1-10) festgelegt.*

Mit insgesamt 121 Action Items, die pro Arbeitspaket priorisiert wurden, sollen die Markt-Ziele 2020, der so genannte *Snapshot 2020* erreicht werden Die Schweizer Beiträge zu den einzelnen Arbeitspaketen sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst:

Arbeitspaket / Innovation and Development Action IDA	Priorität	Schweizer Akteure
1. Hydrogen Vehicles and Refuelling Stations		
6. PEM-Membrane	hoch	PSI
22. System Integration, Drive Train	hoch	PSI, Michelin, HTI, MES DEA
24.&25. Component-Manufacturing & Evaluation	hoch	“
32. SME support	mittel	MES DEA
2. Sustainable Hydrogen Production and Supply		
3. Low Temperature Electrolyser	hoch	IHT
11. Thermal-Electrical-Chemical Decomposition of water with solar/nuclear heat sources	hoch	PSI, ETHZ
12. Photoelectrolysis, Photobiological Fermentation	hoch	EPFL, EMPA, Uni Basel
15. Solid State Off-Board H_2 Storage	hoch	EMPA, Uni Genf
3. Fuel Cells for CHP and Power Generation		
1. Generic Fuel Cell Technology	hoch	HTceramix
2. Analysis and Modelling	mittel	ETHZ, EPFL, ZHAW, EMPA
4. System-, Component-Development	mittel	Hexis, HTceramix

6.-7. Demonstration	mittel	Hexis
4. Fuel Cells for Early Markets		
1/11. SotA technology prototypes (μFC/portable)	hoch	ETHZ, EPFL/CEKA, PSI, FH
2-8/12-18. System Development (μFC/portable)	hoch	Biel und Luzern
9-10/19-20. Demonstration (μFC/portable)	hoch	“
39-41. SME support	hoch	CEKA

Tabelle 4.3: *Forschungspakete des 7. EU FRP zur Realisierung des Snapshot 2020, einem Zwischenschritt zur Realisierung der Vision*

Die technischen und wirtschaftlichen Vorgaben, welche für die einzelnen Arbeitspakete formuliert wurden, gelten für die Schweiz ebenso wie für die übrigen Mitgliedsländer des europäischen Forschungsrahmenprogramms. Sie sind in die Ziele in Kapitel 5 eingeflossen.

Im Jahr 2008 wird die Europäische Kommission entscheiden, ob die Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologien zu einem europäischen Schlüsselbereich erklärt werden soll, in dem die Kompetenzen von Forschung, Wirtschaft und Politik in einer ***Joint Technology Initiative JTI*** zusammengezogen werden. Ziel einer JTI ist die Mobilisierung von privaten und öffentlichen Mittel in der Grössenordnung von 3 Mia€ für das FRP 7, wodurch gegenüber den Konkurrenten Japan und Amerika ein technologischer Vorsprung von 5 Jahren erreicht werden soll. Die JTI wird von einem Verwaltungsorgan gesteuert, in dem die Industrie 6 Sitze, die Kommission 5 Sitze und die Forschungsinstitutionen 1 Sitz einnehmen. Von Schweizer Seite sind *Hexis* und *Htceramix* in der *Industry Grouping* und das PSI in der *Research Grouping* vertreten. Die Koordination der Schweizer Beteiligungen wird eine Aufgabe sein, die nach dem Entscheid der Kommission in Angriff genommen werden muss.

Das ***ERA-NET HY-CO*** wurde im Jahr 2005 gegründet. Ziele dieser Initiative sind:

- Bereitstellen einer Plattform für den Informationsaustausch und die Koordination von nationalen und regionalen Programmen und Forschungsaktivitäten und deren Integration in die Forschungsrahmenprogramme.
- Durchführen von gemeinsamen Projekten zur Stärkung der Zusammenarbeit zwischen nationalen Programmen.
- Etablierung einer Wissensbasis für eine gemeinsame Politik in Richtung einer Wasserstoff-Wirtschaft.
- Stärkung der europäischen Forschungs- und Demonstrationsinfrastruktur für Wasserstoff und Brennstoffzellen durch Abgleichung von Programmen, Personenaustausch und gezielte Integrationsaktivitäten.

In einer zweijährigen Phase haben sich die Mitgliedsländer (Österreich, Belgien, Tschechien, Dänemark, Finnland, Frankreich, Deutschland, Griechenland, Island, Italien, Nordic Energy Research, Norwegen, Portugal, Rumänien, Slowenien, Spanien, Schweden, Schweiz, Niederlande, Grossbritannien) darüber verständigt, welche gemeinsamen Linien verfolgt werden sollen und haben im Jahr 2007 zwei Projektausschreibungen lanciert. Am 29. Juni 2007 hat das österreichische Ministerium für Transport, Innovation und Technology (BMVIT) in Kooperation mir der österreichischen Forschungsförderung-Gesellschaft (FFG) in der Programmlinie A3plus *alternative Antriebssysteme und Treibstoffe* eine Ausschreibung lanciert. Die Ausschreibung war offen für generelle transnationale Kooperationsprojekte. Österreich, Deutschland und die Schweiz haben für die jeweiligen nationalen Konsortien Fördermittel bereitgestellt, wobei die Schweiz ein Projekt zur Entwicklung eines Flüssigwasserstoff-Tanks bewilligt hat. Neben dieser Ausschreibung hat Norwegen eine Projektausschreibung zum Thema Wasserstoffspeicherung lanciert. Beide Ausschreibungen sind mittlerweile abgelaufen. In den kommenden vier Jahren wird sich die Schweiz mit ca. 100'000 Fr. pro Jahr an weiteren Ausschreibungen beteiligen, um sich im laufenden Strukturierungsprozess mit den passenden Partnerländern zu vernetzen.

Beurteilung und Ziele bezüglich der europäische Zusammenarbeit: Die internationale Zusammenarbeit im Rahmen der europäischen Initiativen befindet sich in einem starken Wandel hin zu einem gut strukturierten Forschungsraum mit einer starken Vernetzung und Steuerung.
Ziel ist es, dass die Schweiz sich noch verstärkt aktiv in diesen Prozess einbringt (a) durch die Mitgestaltung der Technologieplattform Wasserstoff und Brennstoffzellen, resp. der geplanten Joint Technology Initiative, (b) durch eine möglichst hohe Beteiligung an den Ausschreibungen des 7. Forschungsrahmenprogramms und (c) durch eine gezielte Vernetzung mit europäischen Partnern im Rahmen des ERA-NET HY-CO.

5. Technische und wirtschaftliche Zielsetzungen

Die Anwendung von Brennstoffzellen in Fahrzeugen, zur Wärme-Kraft-Bereitstellung WKK und in tragbaren Systemen muss sich an den technischen Parametern von vorhandenen Konversionstechnologien wie Verbrennungsmotor, Diesel-/Öl-/Gas-Kraftwerk, Öl-/Gas-Brenner-Heizung, Batterie, etc.) orientieren, um im Markt eingeführt werden zu können.

Brennstoffzellen erreichen PEFC, SOFC	die **Benchmarks** von Batterie, Verbrennungsmotor, Oelbrenner
für Zuverlässigkeit unterbruchsfreier Betrieb	2050 (Batterie 2007)
für Lebensdauer Degradation auf 80%	2050
für Investitionen (System) Investitionskosten	2020

Tabelle 5.1: *Die Abschätzung der Performanceentwicklung – Zuverlässigkeit (rosa), Lebensdauer (grün), Investitionen für Brennstoffzellen-Systeme (blau) und der grobe Vergleich mit vorhandenen Konversionstechnologien als Benchmarks, ergibt eine Grössenordnung, wann diese für die Brennstoffzellentechnologie etwa erreichbar sind (zusammen mit CH Stakeholdern erarbeitet).*

Tabelle 5.1 zeigt hierzu, auf der Basis eines Vergleiches zwischen der zu erwartenden Entwicklung der drei Schlüsselfaktoren **Zuverlässigkeit**, **Lebensdauer** und **Systeminvestitionen** von PEFC und SOFC Systemen und vorhandenen Konversionstechnologien, die grobe Grössenordnung, wann die Benchmarks von der Brennstoffzellentechnologie etwa erreichbar sind. Vor allem die Zuverlässigkeit von Batterien kann bereits heute zum Teil schon erreicht werden (z.B. USV). Die Investitionskosten dürften um 2020 in den Bereich der heutigen Systeme im Markt kommen und zu guten Marktchancen führen. Dies besonders in Kombination mit den weiteren Vorteilen (Wirkungsgrad, Emissionen, ..), was durchaus eine noch länger vorhandene tiefere Zuverlässigkeit und Lebensdauer gegenüber Verbrennungsmotoren und Öl-/Gas-Brenner-Heizungen kompensieren kann.

Ebenso muss die Verwendung des Sekundärenergieträgers Wasserstoff gegenüber dem Sekundärenergieträger Strom klare Vorteile aufweisen. Die **europäische Kommission** hat im Rahmen der Technologieplattform Wasserstoff und Brennstoffzellen (HFP) **technische Ziele** definiert, die für Forschungsprojekte im Rahmen des 7. Forschungsrahmenprogramms (FRP) als Benchmark dienen (siehe Kapitel 4). Diese Ziele gelten für die Schweizer Energieforschung ebenso, wie für die Energieforschung der übrigen Mitgliedsländer des 7. FRP. Die wichtigsten und für die Schweiz relevanten technischen Ziele bis 2015 sind in der Tabelle 5.2 aufgelistet.

Das Erreichen der Ziele betreffend Schlüsselfaktoren Leistung, Zuverlässigkeit und Lebensdauer bedingt sowohl bei der Wasserstoff- wie auch im Brennstoffzellentechnologie weiterhin ein sehr hohes Mass an Grundlagenforschung, dies insbesondere im Nanobereich der Materialwissenschaften. Darüber hinaus müssen ferner die Kompetenzen der Modellierung ausgebaut und der Validierung von Dauertests vertiefte F+E Aufmerksamkeit geschenkt werden.

Für die Markteinführung der Technologien sind **Pilot- und Demonstrationsanwendungen** insbesondere für die in den Bereichen Wasserstoff und Brennstoffzellen tätigen KMUs von zentraler Bedeutung. Die Förderung solcher Anwendungen orientiert sich an den Erfahrungen, die weltweit bereits gemacht und im Annex 18 des IEA Wasserstoff Implementing Agreements (IEA-HIA) sowie in den Tasks 19-21 des IEA Advanced Fuel Cell Implementing Agreements (IEA-AFC) zusammengetragen wurden (siehe Kapitel 4). Ausserdem müssen sich P+D-Projekte an den Marktzielen des Implementationsplans der europäischen Kommission orientieren (siehe Kapitel 4). Der grösste Bedarf für P+D Projekte wird in der Gebäude integrierten Wasserstoffproduktion und im Mobilitätsbereich gesehen. Die **Herausforderung im Gebäudebereich** besteht bei der optimierten Systemintegration der Kette Photovoltaik-Hochdruckelektrolyse-Metallhydridspeicher und anschliessend der Kette Photoelektrolyse-Metallhydridspeicher. Zusätzlich zu den technisch-wirtschaftlichen Aspekten eines solchen Systems ist der Aspekt der Sicherheit von zentraler Bedeutung. Die **Herausforderung im Mobilitätsbereich** besteht in der Demonstration der Kette nachhaltige und grosstechnische Wasserstoffbereitstel-

lung, Verteilung und Speicherung sowie effiziente Verwendung in mobilen Anwendungen. Bis zum Jahr 2011 sollen vorbereitende Teilarbeiten in Angriff genommen und je nach Engagement der Privatwirtschaft und der Budgetsituation systembedingte Umsetzungsschritte in Angriff genommen werden.

Brennstoffzellen als Fahrzeugantrieb	**2007**	**2015**
Effizienz PEFC-PW-Antrieb (NEDC) [%]		40
Spezifische Kosten PEFC-PW-Antrieb – nur Stack [EUR/kW]		100
Lebensdauer PEFC-PW-Antrieb [Std]		5’000
Brennstoffzellen in WKK Anwendung		
SOFC-WKK el. Effizienz @ BOL inkl. DC/AC Konversion [%]	30-40	40
SOFC-WKK Brennstoff-Effizienz BOL @ Optimum [%]	> 70	80
SOFC-WKK Systemkosten [EUR/kW]	< 20’000	6’000
SOFC-Stack-Lebensdauer (90%BOL) [Std.]	5’000	12’000
Anzahl SOFC-Tieftemperaturstarts von 15°C pro Jahr	20	50
portable Brennstoffzellen		
Energiedichte [Wh/L]		500-1’000
spezifische Energiedichte [Wh/kg]		150-200
volumetrische Leistungsdichte [W/L]		80-150
gravimetrische Leistungsdichte [W/kg]		80-200
Lebensdauer [Std.]		1’000-5’000
Kosten [EUR/kW]		3’000-5’000
Betriebstemperatur [°C]		-20 - 80
Tieftemperatur Elektrolyse		
Energieeffizienz (Basis Heizwert H_u) [%]		70
Stromdichte [A/cm^2]		1
Kosten eines modularen Systems [EUR/Nm^3 Tagesproduktion]		1’000
Verfügbarkeit des Systems [%]		99
Betriebsdruck (neue, effiziente Systeme) [MPa]		3-5
Photoelektrolyse		
Kosten H_2 aus Photoelektrolyse [EUR/kg ≈ 8.4 EUR/GJ]		5
Bestätigte Effizienz vs PV + Elektrolyseur [%]		25
Lebensdauer Photoelektrolysezelle [Std.]		5’000
solare Hochtemperatur-Elektrolyse		
Kosten H_2 aus Hochtemperatur-Elektrolyse [EUR/ kg ≈ 8.4 EUR/GJ]		2
komplexe Metallhydride		
Dichte stationärer Metallhydrid-H_2-Speicher [kWh/L]	0.7	
Dichte stationärer Metallhydrid-H_2-Speicher [Gew.%]	1.8	5
Desorptionstemperatur Metallhydrid-H_2-Speicher [°C]		120

Tabelle 5.2: *technische Zielsetzungen und Benchmarks für die Forschung auf dem Gebiet der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Technologien [Quelle – Implementation Plan]*

Neben den P+D Anwendungen sind **begleitende Marktaktivitäten im Rahmen von EnergieSchweiz** zentral. Insbesondere die Information und die Kommunikation mit den potentiellen Anwendern der Technologien sind für die Schweiz wichtig. Bisher existieren keinerlei Aktivitäten im Rahmen von EnergieSchweiz, was die Themen Wasserstoff und Brennstoffzellen betrifft. Bis 2011 wird angestrebt, erste Aktivitäten zu verankern. Als Schwerpunkt sollen mittels einer Serie von Feldtests die technischen, wirtschaftlichen und sozialen Fragen im Zusammenhang mit der dezentralen WKK-Anwendung von Festoxid-Brennstoffzellen beantwortet werden.

Beurteilung der technischen und wirtschaftliche Zielsetzungen: Die technischen und wirtschaftlichen Zielsetzungen sind mit der Europäischen Kommission abgeglichen. Dabei spielt insbesondere das zielgerichtete Fortführen der Grundlagenforschung eine stützende Rolle für den Erhalt von Fachkompetenzen und Exzellenz.
Das Sammeln von Erfahrungen mittels Pilot- und Demonstrationsprojekten wird auf die gebäudeintegrierte Wasserstoffkette (Produktion, Speicherung, Anwendung) und auf die energetische Verwendung von Wasserstoff im Mobilitätsbereich fokussiert. Bis 2011 werden vorbereitende Arbeiten und, soweit das Engagement der Privatwirtschaft gewonnen werden kann und es die Budget-Situation im P+D-Bereich erlaubt, die Umsetzung in Angriff genommen.
Begleitende erste Demonstrationsaktivitäten sollen bis 2011 u.a. auch bei EnergieSchweiz verankert und auf die dezentralisierte WKK-Anwendung von Festoxid-Brennstoffzellen fokussiert werden. Dies dient als Brückenschlag zur Marktumsetzung, welche dem Portfolio der KTI zugesprochen wird.

6. Mitteleinsatz für die Forschung im Bereich Wasserstoff und Brennstoffzellen

ÖFFENTLICHE HAND

Gemäss der Projektliste der Energieforschung des Bundes [2] wurden für die Forschung auf dem Gebiet der Brennstoffzellen circa 6 Millionen Franken pro Jahr und auf dem Gebiet von Wasserstoff gut 2 Millionen Franken pro Jahr investiert. Der Einsatz von P+D-Mitteln wurde im Bereich der Brennstoffzellen in den Jahren 2003 bis 2005 von 1. 6 Mio. Fr. pro Jahr auf 0.1 Mio. Fr. pro Jahr zurückgefahren, während er im gleichen Zeitraum im Bereich Wasserstoff bei 0.4 Mio. Fr. pro Jahr konstant blieb. Die Herkunft der Fördergelder ist in Tabelle 6.1 zusammengefasst:

	Herkunft der Mittel								**Totale**
	ETH-Rat	SNF	KTI	BFE	SBF	EU	Div.	Kantone, Gemeinden	
Brennstoffzellen	2.53	0.12	0.66	1.18	0.75	0.22	0.01	0.81	6.3
Wasserstoff	0.90	0.13	-	0.65	0.13	0.28	0.01	0.39	2.5
Total BZ + H2	**3.43**	**0.25**	**0.66**	**1.83**	**0.88**	**0.50**	**0.02**	**1.20**	**8.8**
Total alle Bereiche zum Vergleich	79.80	4.90	6.50	28.20	10.90	9.00	2.70	16.60	158.50

Tabelle 6.1: *Herkunft der Fördermittel für ausgewählte Bereiche der Energieforschung als Mittelwert der Jahre 2003 bis 2005 (in Mio. Fr.) und Verteilung auf die Forschungsgebiete (inkl. P+D). Die Zahlenangaben sind lediglich als Grössenordnung zu betrachten und können – aus finanztechnischen Gründen der Förderstellen – von Jahr zu Jahr erheblich schwanken.*

Der wichtigste Akteur der Forschung in den Bereichen Wasserstoff und Brennstoffzellen ist der ETH-Bereich. Das Engagement des Schweizerischen Nationalfonds und der KTI zeigt, dass die Forschungsthemen das ganze Spektrum von der Grundlagenforschung bis zu marktnahen angewandten Forschung abdecken. Das relativ hohe Engagement des BFE zielt vor allem darauf ab, sowohl Forschungsaktivitäten wie auch -resultate in die Privatwirtschaft zu transferieren. Die hohen Beiträge von EU und SBF verdeutlichen die starke internationale Ausrichtung der Forschung. Im Vergleich mit den übrigen Themen der Energieforschung in den Gebieten Erneuerbare Energien und Effiziente Technologien liegt das Thema Brennstoffzellen auf Platz 4 und das Thema Wasserstoff auf Platz 9.

Gemessen am gesamten öffentlichen Mitteleinsatz wurden (i) innerhalb des Forschungsbereiches Brennstoffzellen rund:

- 72% der Mittel für die Forschung im Bereich Festoxid-Brennstoffzelle (SOFC)
- 23% für die Polymer-Elektrolyte-Membrane Brennstoffzelle (PEFC)

und (ii) innerhalb des Forschungsbereiches Wasserstoff rund:

- 28% der Mittel für die Wasserstoff-Speicherung (ca. 50% für komplexe Metallhydride und 50% für Hochdruck- und Flüssigwasserstoff-Speicher)
- 30% der Mittel für die Wasserstoffbereitstellung mittels Photoelektrolyse
- 20% der Mittel für die Wasserstoffbereitstellung mittels Hochtemperatur-Prozessen (solar und keramische Hochtemperatur-Elektrolysezelle)

verwendet.

Gemäss dem Konzept der Energieforschung des Bundes 2008 – 2011 [1] wird eine Erhöhung der öffentlichen Mittel für die Forschung im Bereich Brennstoffzellen von 6 auf 8 Millionen Franken pro Jahr und im Bereich Wasserstoff von 2 auf 3 Millionen Franken pro Jahr angestrebt. Für P+D-Projekte sollen die Mittel im Bereich Brennstoffzellen von 0.1 auf 2 Millionen Franken pro Jahr und im Bereich Wasserstoff von Millionen Franken erhöht werden. Dieser Anstieg soll insbesondere durch die in der BFI-Botschaft vorgesehene Erhöhung der Forschungsmittel und die Erhöhung der Mittel für die Beteiligung am 7. Europäischen Forschungsrahmenprogramm erzielt werden. Im P+D-Bereich stehen die Bemühungen des BFE, im Rahmen der Aktionspläne Energieeffizienz und Erneuerbare Energien die P+D-Mittel neu aufzubauen, im Zentrum. Neben diesen Anstrengungen, die für die ganze Energiefor-

schung unternommen werden, hat die Vernetzung der Akteure in den Bereichen Wasserstoff und Brennstoffzellen zu einer erhöhten Wahrnehmung und damit zu einer Verbesserung der Chancen bei der Akquisition von Drittmitteln von Gemeinden, Kantonen, privatwirtschaftlichen Fonds und von der EU geführt. Der Prozess der Vernetzung wurde 2007 weitgehend abgeschlossen und sollte bis 2011 von einer aktiven Informationskampagne im Rahmen von EnergieSchweiz abgelöst werden, um neue Akteure vor allem auf kommunaler und kantonaler Ebene aber auch aus der Industrie zu gewinnen.

PRIVATWIRTSCHAFT

Die privatwirtschaftlichen Mittel beschränken sich weitgehend auf das hohe Engagement der involvierten Firmen (siehe Kapitel 3). Die in die Forschung auf dem Gebiet von Wasserstoff und Brennstoffzellen investierten Mittel dürften sich schätzungsweise pro Jahr insgesamt auf einen zweistelligen Millionenbetrag belaufen. Positiv hervorzuheben ist das grosse Engagement von Swisselectric Research im Bereich Brennstoffzellen. Im Jahr 2007 wurden zwei grosse Projekte mit einem Volumen von ca. 1 Millionen Franken pro Jahr mitfinanziert.

Die Involvierung der Privatwirtschaft muss konsequent fortgeführt werden. Das Interesse der Privatwirtschaft kann aber nur dann gewonnen werden, wenn klare wirtschaftliche Vorteile erzielt werden können. Dies ist stark abhängig von der Gestaltung der Rahmenbedingungen für die Technologien. Bei der Vorbereitung der europäischen Joint Technology Initiative (JTI) Wasserstoff und Brennstoffzellen (siehe Kapitel 4) haben sich die europäischen Firmen darauf geeinigt für das 7. Forschungsrahmenprogramm insgesamt 450 Millionen € zu investieren und die Forschungsthemen aktiv mit zu gestalten. Die Weichen zur Markteinführung der Brennstoffzellen und der Technologien zur Wasserstoffbereitstellung werden mit dem Entscheid über die JTI voraussichtlich in Verlauf von 2008 gestellt werden. Bei einem positiven Entscheid sollte im Rahmen von EnergieSchweiz eine Informationskampagne gestartet werden, um die Themen Wasserstoff und Brennstoffzellen aus ihrem Schattendasein herauszuholen und die Chancen und Risiken der Technologien im europäischen Kontext offen aufzuzeigen.

Beurteilung und Ziele bis 2011: Die im Konzept der Energieforschung des Bundes 2008 – 2011 formulierten Ziele für die Erhöhung des Mitteleinsatzes der öffentlichen Hand sind realistisch und gehen in die richtige Richtung. Wichtig ist insbesondere der Wiederaufbau von P+D-Mitteln. Die Erhöhung der Forschungsmittel sollte einhergehen mit einem Aufbau von begleitenden Marktaktivitäten im Rahmen von EnergieSchweiz, um ein höheres Engagement der Kommunen, Kantone und der Privatwirtschaft zu mobilisieren. Diese Aktivitäten sollten vorerst auf die Kommunikation fokussiert werden.

7. Forschungsschwerpunkte in den Jahren 2008 – 2011

Gemäss dem Konzept der Energieforschung des Bundes 2008 – 2011 sind folgende, in Tabelle 7.1 dargestellten Ziele und Forschungsschwerpunkte zu verfolgen:

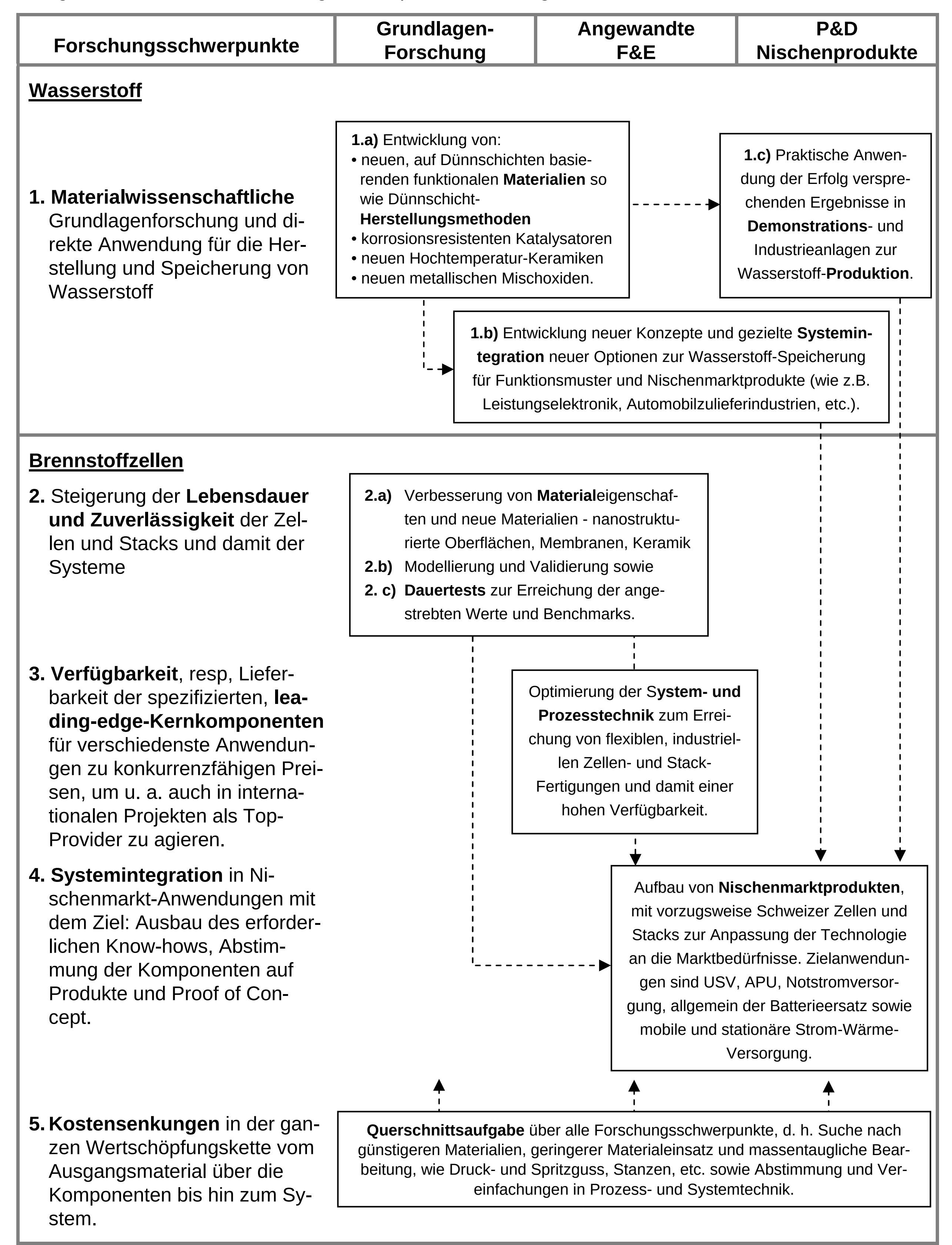


Tabelle 7.1: *Ziele und Forschungsschwerpunkte des Programms Wasserstoff und Brennstoffzellen und Zuteilung zum entsprechenden F&E und P&D-Bereich.*

Konkret sollen in den nächsten vier Jahren durch die BFE Programme Brennstoffzellen und Wasserstoff folgende Ziele erreicht werden

WASSERSTOFF

1. a) Materialwissenschaftliche Grundlagenforschung

Die in der Schweiz pionierte photoelektrochemische (PEC) Wasserspaltung steht im Vordergrund der Forschungsaktivitäten zur Wasserstoffproduktion. Dabei sind insbesondere Fragen der Materialentwicklung zu lösen. Die diesbezüglichen Kompetenzen der Schweizer Forschungslandschaft sind im Begriff in einem spezifischen „**PEChouse**" Netzwerk zusammengeführt zu werden.

Als Fokusmaterialien gelten Hämatit (Fe_2O_3) Photoanoden, mesoporöse Mischoxide als Trägermaterialien für Photoanodensysteme, und neuartige leitende nanokristalline Oberflächen mit sehr grosser Gesamtoberfläche (zB Silica-Nanopartikeln und Kohlenstoff-Nanoröhrchen).

Als wissenschaftliche und technische Ziele und Meilensteine für PEC-Wasserspaltung gelten bis 2011 die relevanten Ziele der EU. Diese sind:

- ⇨ Solar-zu-Wasserstoff (STH) Systemwirkungsgrade von 4.5% bis 2009, und 7% bis 2011.
- ⇨ Systemlebensdauer bis 2011: 1000h bei maximal 5% Leistungsdegradation.
- ⇨ Wasserstoffproduktionskosten bis 2015: < 5 €/kg H_2.

Im Bereich der Wasserstoffspeicherung wird im Rahmen dieses Programms vornehmlich im vielversprechenden Bereich der Metall-Hydride geforscht. Dabei werden neueste Materialansätze, Materialtests und Aspekte der Sicherheit erforscht.

Es wird insbesondere erstrebt:

- ⇨ Komplexe Hydride oberflächenanalytisch zu untersuchen und den Mechanismus der Wasserstoffsorption und -desorption hinsichtlich der möglichen Zwischenstufen, inklusive als Funktion der Wasserstoffkonzentration, genauestens zu verstehen; und
- ⇨ Sicherheitsfragen betreffend Auswirkungen von Verunreinigungen und von Luft auf die exothermen Oberflächenreaktionen sowie auf die Passivierungmechanismen zu studieren.

1. b) Gezielte Systemintegration (H2-Speicherung)

Anhand von detaillierten Systemkonzeptstudien für mögliche Demonstrationsprojekte wird versucht, Schlüsselfragen der Systemintegration zu beantworten. Als Demonstrationsprojekte sollen konkret je ein Projekt im Mobilitätsbereich („HyMove") sowie eines im Speicherbereich („ReproHy") studiert.

Ferner wird versucht, im Rahmen eines transnationalen HyCo-Eranet Projektes (Österreich – Schweiz) die Entwicklung, Fertigung und Funktionsabsicherung von Hochleistungs-Mehrwegventilen sowie -Wärmeübertragern für Flüssigwasserstoff-Speichersysteme in Kraftfahrzeugen unter Berücksichtigung der Anforderungen einer Massenfertigung in der Automobilindustrie zu erarbeiten.

1. c) Praktische Anwendung (H2-Produktion-Speicherung, Demonstration)

Die praktische Anwendung der Wasserstoff-Energiekette soll, nach erfolgreich abgeschlossenen Konzeptstudien der Systemintegration, anhand von einer oder mehreren kleinen Demonstrationsanlagen erfolgen. Wie gross, wo und mit welchen Partner ein solches Projekt gestartet und ausgebaut werden kann ist Gegenstand von aktuellen Diskussionen und Abhängig von entsprechenden Budgetpositionen. Beispiele sind: H2-Tankstellen in Binnenseehäfen, durchgängige Demonstration und Anwendung der Solarwasserstoffkette (EMPA oder WEKA: PV + Elektrolyseur + Speicherung + Anwendungen im Forschungs- oder Mobilitätsbereich (Komunalfahrzeug) + Ausbildung).

BRENNSTOFFZELLEN

2. Lebensdauer und Zuverlässigkeit

Bei der **SOFC-Technologie** sind die Hauptziele der pre-competitiven Forschung für Lebensdauer und Zuverlässigkeit, welche durch das SOF-CH Konsortium bearbeitet werden, wie folgt:

Für statische Bedingungen (Volllast, Teillast)

- Reduktion der Degradation auf <1% pro 1000h
(Anode: <0.5% pro 1000h, Kathode: <0.2% pro 1000h)
- Verminderte Streuung der Sampels

Für transiente Bedingungen (thermische Zyklen, Brennstoffausfall, Stopp, Lastwechsel)

- Reduktion der Degradation auf <2% pro Zyklus
- Verminderte Streuung der Sampels

Ein weiterer Meilenstein ist es zudem 2012 22'000h Lebensdauer erreicht zu haben

Aus bereits injizierten Forschungs- und Testsvorhaben (2c), sollen gezielt Daten für die Validierung von Miro- und Macroberechnungsmodellen resultieren, die entsprechend zu wichtigen Verständnissprüngen und Verbesserung der Mechanismen (Elektrodenherstellung, Elektrolytdegradation) führen. Mittel- bis langfristig ist der Entwicklung von industrietauglichen Berechnungs- und Auslegungstools ein wichtiger Meilenstein (2b).

Bei der **PEFC -Technologie** wird die pre-competitiven Forschung durch das sogenannte PEF-CH Konsortium unter der Führung des PSI Villigen (siehe Figur 7.1) koordiniert und auf die Bedürfnisse der Industrie fokussiert. Folgende wissenschaftlichen Ziele wurden abgeleitet:

Beim Ceka Stack ist das wissenschaftliche Ziel (Dissertation) 2008-2010 einen wesentlichen Schritt in der Klärung und Verbesserung der Mechanismen, welche während der verschiedenen Start- und Stopphase die MEA Performance beeinflussen. Entsprechende Auslegungsgrundlagen sollen erarbeitet und 1:1 angewendet werden.

Für den MesDea Stack ist analog das wissenschaftliche Ziel (Dissertation) 2008-2010 die lokale Untersuchung und damit das Verständnis sowie wesentliche Verbesserung der Vorgänge während der transienten Betriebsbedingungen (z.B. Kurzschluss zur Befeuchtung der Membran).

Im Detail werden in den Projekten folgende Themen und Ziele fokussiert untersucht:

- Entwicklung kostengünstiger protonen-leitender Polymermembranen, die als Festelektrolyte in PEFC und H2O-Elektrolyseuren zum Einsatz kommen, wobei sie verschiedene Funktionen zu erfüllen haben: Protonenleitfähigkeit, Gastrennung, Grenzfläche zu den Elektroden, Dichtungsfunktion, usw. Die Anforderungen für Polymermembranen in diesen Zellen sind komplex, insofern handelt es sich bei der Entwicklung solcher Membranen um ein Optimierungsproblem mit mehreren Freiheitsgraden.
- Untersuchung von Elektrodenmaterial, basierend auf CNTs und Perovskiten, mit einer optimalen katalytischen Aktivität aufgrund einer hohen Sauerstoff- und OH-Bindungsenergie. Ziel ist, dass eine um 30% höhere Effizienz als mit dem herkömmlichen Elektrodenmaterial erreicht wird.
- Quantifizierung der Membran-Degradationsmechanismen um die Abhängigkeit der Schädigungsrate von Betriebsbedingungen und Membranzusammensetzung zu kennen. Dies erlaubt beschleunigte Alterungsversuche an Membranen durchzuführen und damit den Probendurchsatz deutlich zu erhöhen. Damit werden die Innovationszyklen signifikant kürzer. Die Entwicklung von Methoden umfasst auch Post-Mortem Diagnostik, um das Ausmass der Membrandegradation qualitativ und quantitativ in einer Auflösung im Millimeterbereich zu bestimmen.
- Charaktisierung der GDL-Materialien um die Abhängigkeiten von Struktur – Gastransport - Wassersättigung verstehen und quantifizieren zu können.
- Entwicklung eines Berechnungs- und Auslegungstools um über die Kenntnis von Materialcharakteristiken Eigenschaften der Brennstoffzellen vorzubestimmen können

3. Verfügbarkeit

Projekte bezüglich verbesserter Verfügbarkeit werden unter anderem von der KTI und Swiss Electric Research unterstützt. Ziel des Brennstoffzellen Programms ist es die CH-Stakeholder bei der Erreichung ihrer Roadmapziele intensiviert zu unterstützen. Im speziellen heisst das, Unterstützung beim Finden entsprechender Partnerschaften und Set-up von Projekten (Vernetzung, siehe Kapitel 8).

Im SOFC Bereich sind z.B. konkrete Ziele:

- Hexis: 40 Galileo Einheiten bis 2012 installiert
- SOF-CH: 1 MW (1000 1kW Systeme) bis 2015 installiert.

Im PEFC Bereich ist eine Testing Task-Force im Aufbau, d.h. im Rahmen von PEF-CH wurde eine vertiefte Kooperation des PSI Villigen mit der BFH TI Biel im Testingbereich gestartet. Fernziel ist der Aufbau einer sogenannten „Modelling und Validation Factory“, welch eine breite Palette von Testing- und Begutachtungsmöglichkeiten bis hin zur Zertifizierung quasi aus einer Hand anbieten kann.

Kurz- und mittelfristiges Ziel sind Langzeit- und Performancetests für die CH-Industriepartner, welche für künftige Kunden eine entsprechende Expertise (später auch Garantie) der Verfügbarkeit bedeuten. Geplant sind Test über >1'000h (2008-2009), spezielle Lastzyklen, und auch Untersuchung der Alterung. Mit den gewonnenen Daten können zusammen mit Post-Mortem-Analysen zudem wichtige Verständnisfragen geklärt werden, eine Fehler- und Ausfallanalyse und entsprechende Berechnungs- und Auslegungstools aufgebaut werden. Die direkte Umsetzung in Pilotkundenprojekte ist dann ein wichtiges Vertrauens-Standbein für die erstarkenden Schweizer Zulieferer.

4. Systemintegration

Dieser Schwerpunktbereich ist besonders Marktnah und was eine gute Chance zur Initiierung von KTI-Projekten gibt.

Bei HTceramix ist die Verbesserung der HotBox als ein für Systemintegratoren klar definiertes Modul mit spezifizierten Schnittstellen im Vordergrund.

Bei der Firma Ceka ist der nächste Schritt die Entwicklung von einem serienreifen, modular gesteuerten und aufgebauten PEFC-System, bei welchem sowohl luftgekühlte wie auch flüssigkeitsgekühlte Stapel eingesetzt werde können. Dadurch kann ein sehr breiter Leistungsbereich von 200 W – 20 kW gedeckt werden, was den Einsatz dieser Brennstoffzellensystemen in verschiedensten spezifischen Anwendungen ermöglicht. Als erste spezifische Anwendung soll ein 5 kW System in einer USV-Anlage integriert und vertrieben werden.

Ein etwas anderer Weg gehen die Firma Hexis und Mesdea, die mit bereits voll integrierten Systemen, respektive Anwendungen im stationären Bereich (Hausenergiezentrale), respektive im Mobilitätsbereich (Scooter) entsprechende Kundensegmente bearbeiten.

Insgesamt steht hier eine Fortsetzung und Ausbau der laufenden Aktivitäten, wie sie in Figur 2.3 gezeigt sind, eine vermehrte Involvierung von zusätzlichen (System-)Kompetenzträgern und eine Teilnahme in EU Projekt im Fokus.

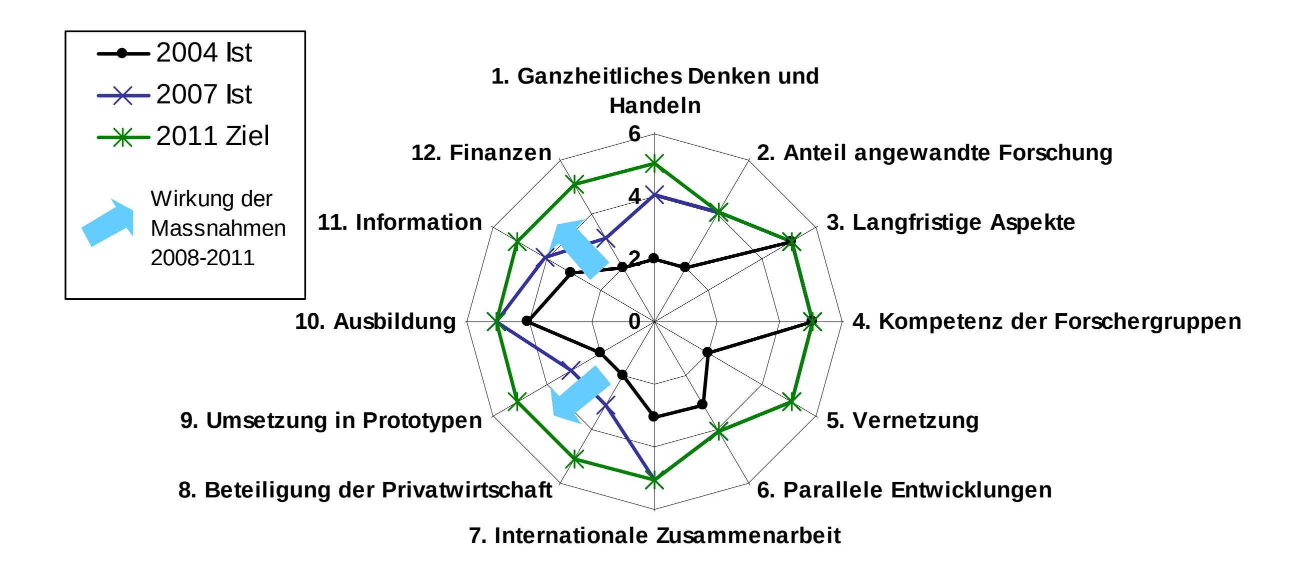
5. Kostensenkungen

Angaben zu Möglichkeiten und Zielen dieser Querschnittsaufgabe sind bei allen Forschungsschwerpunkte zu finden. Ziel und Know-how der beteiligten Firmen sind das baldige Erreichen von konkurrenzfähigen, gewinnbringenden Kostenstrukturen. Messlatte sind die sehr, ambitiösen Ziele der EU (siehe Kapitel 5, Tabelle 5.1).

Kostensenkungen hängen unter anderem auch von der Anzahl verkaufter Systeme ab. z.B. im PEFC-Bereich bei Ceka senkt schon eine Anzahl von ca. 200 verkaufter Systeme, was ein erreichbares Ziel in den Jahren 2010-2011 ist, die Stackkosten von 5'600.-CHF/kW auf ca. 2'600.- CHF/kW (heutige Berechungsbasis). Hierbei ist die Teilnahme als Material, Komponenten oder Systemlieferant in Forschungsprojekten, der Aufbau von Demonstratoren und die Motivation von Nischen-Kunden zu Kleinserien ein wichtiger Initialpunkt.

8. Programmziele

Die Programmziele für das Jahr 2011 werden anhand der Leitsätze der CORE formuliert (siehe [1]) und basieren auf den Beurteilungen, welche in den einzelnen Kapiteln vorgenommen wurden und nachfolgend für jeden Leitsatz ausformuliert sind. Die Leitung der BFE-Programme Wasserstoff und Brennstoffzellen wird in den Jahren 2008 – 2011 seine Arbeiten und die ihr zur Verfügung stehenden Instrumente so einsetzen, dass eine Wirkung in die gewünschte Richtung erfolgt (siehe Figur 8.1). D.h. Initiierung von unterstützenden Aktivitäten, welche die Hauptschwachpunkte - Mangelnde Beteiligung der Privatindustrie und ungenügende Umsetzung in Prototypen sowie zielgruppengerechte Information und Ausbau der Finanzierungsmöglichkeiten - beheben.



Figur 8.1: *Beurteilung der Fortschritte der Forschung in den Gebieten Wasserstoff und Brennstoffzellen in der Periode 2004 – 2007 und der notwendigen Massnahmen in der Periode 2008 – 2011; Der Wert 0 bedeutet: die Dimension ist völlig ungenügend, der Wert 6 bedeutet: die Dimension ist sehr gut entwickelt; Die Werte reflektieren die Meinung der Programmleitung Wasserstoff und Brennstoffzellen und wurde von der Eidgenössischen Energieforschungskommission beurteilt.*

1. Ganzheitliches Denken und Handeln

Unter ganzheitlichem Denken und Handeln wird die Wirkung in den drei Nachhaltigkeitsdimensionen; (a) Gesellschaft, (b) Wirtschaft und (c) Umwelt verstanden. Da sich die Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Technologien für den Energiebereich grösstenteils in der Forschungs- und Entwicklungsphase befinden, muss für die Beurteilung dieser Dimension auf die Abschätzung der Potentiale (Kapitel 2) zurückgegriffen werden. International ist man sich einig, dass die Technologien Vorteile in allen drei Dimensionen bergen, sofern geeignete politische Rahmenbedingungen aktiv geschaffen werden. In der Schweiz sind die Technologien in den politischen Instrumenten vollkommen unreflektiert, was sich in der Tatsache spiegelt, dass sie weder in den Aktionsplänen des Bundesrats [12] noch bei EnergieSchweiz [13] verankert sind. Auf der anderen Seite sind die Technologien im offenen Markt noch nicht konkurrenzfähig, daher ist bis 2011 als erste Massnahme lediglich eine Kommunikationsinitiative bei EnergieSchweiz zu verankern. Mit dieser Initiative soll ein gesellschaftlicher Dialog in Gang gebracht werden, der den Stand der Technologien sachlich aufzeigen und zu deren vermehrten Anwendung führen soll. Die Initiative wird nur dann lanciert, wenn die EU positiv über die Etablierung der Joint Technology Initiative entscheidet (s. Kapitel 4).

2. Anteil Angewandte Forschung

Aufgrund der Neuartigkeit der Anwendung der Technologien im Energiebereich ist ein grosser Anteil von Grundlagenforschung zu verzeichnen, was als zweckmässig beurteilt wird. Durch die gute Vernetzung der Akteure (siehe Kapitel 3) und durch die stark strukturierte Forschung auf europäischer Ebene (siehe Kapitel 4) ist der Anwendungsfokus stark gegeben und wird sich bei der Etablierung der

Joint Technology Initiative noch verstärken. Dieser Fokus ist beizubehalten, aber nicht zusätzlich zu verstärken.

3. Langfristige Aspekte

Durch die vorhandenen grundlegenden technischen Barrieren, die vor einem breiten Markteintritt bewältigt werden müssen, sind langfristige Aspekte gut abgedeckt. Erst wenn sich einzelne Technologien im Markt etabliert haben, kann über vollkommen neue Ansätze nachgedacht werden. Die Etablierung vollkommen neuer Ansätze wird daher vorerst nicht unterstützt.

4. Kompetenz der Forschergruppen

Die Kompetenz der Forschergruppen wird als sehr gut beurteilt. Diese Beurteilung basiert auf einer Analyse des Staatssekretariats für Bildung und Forschung, die gezeigt hat, dass Schweizer Forschergruppen an überdurchschnittlich vielen Projekten der europäischen Forschungsrahmenprogramme beteiligt sind (siehe Kapitel 4). Diese Kompetenz ist weiterhin hoch zu halten, beispielsweise durch eine selektive Förderung von Schweizer Forschungsprojekten durch das BFE. Zusätzliche Massnahmen sind aber gegenwärtig nicht notwendig.

5. Vernetzung

In der Periode 2004 – 2007 hat eine starke Vernetzung der Akteure stattgefunden, wobei stark auf die Integrierung von industriellen Akteuren und auf die Integration der Projekte in die internationale Zusammenarbeit geachtet wurde. Vor einer Verstärkung der Vernetzung sind die Resultate der Arbeiten der verschiedenen Netzwerke abzuwarten. Die zweckmässige Veränderung der Netzwerke, gemessen an den Anforderungen der Ziele in der Periode 2008 – 2011, wird unterstützt. Zur optimalen Integration der Brennstoffzellen- und Wasserstoff-Technologien wird weiterhin ein intensiver Kontakt zu den folgenden BFE-Forschungsprogrammen gepflegt:

- Wärme-Kraft-Kopplung
- Gebäude
- Verfahrenstechnische Prozesse
- Verkehr und Akkumulatoren
- Industrielle Solarenergienutzung
- Wind

6. Parallele Entwicklungen

In den einzelnen Anwendungsbereichen der Technologien sind keine parallelen Forschungsaktivitäten zu verzeichnen. Aufgrund der guten Vernetzung der Forschungsinstitutionen in der Periode 2004 – 2007 arbeiten die Gruppen Hand in Hand, wodurch sich der Wert in Figur 8.1 leicht verbessert hat. Eine Ausnahme bildet die Begleitung von Anwendungen im PEFC- und im SOFC-Bereich, die von verschiedenen Firmen entwickelt werden. Aufgrund von unterschiedlichen Designs und Anforderungen, welche durch die Zielsysteme vorgegeben sind, machen parallele Arbeiten Sinn, insbesondere weil unterschiedliche Ansätze von Firmen einen Erfolg im Markt wahrscheinlicher machen. In diesen Fällen wird darauf geachtet, dass die Arbeiten auf generische und vor-kompetitive Forschungsaspekte ausgelegt werden, von denen die Firmen gleichermassen profitieren können.

7. Internationale Zusammenarbeit

Wie in Kapitel 4 beschrieben ist die internationale Zusammenarbeit gut etabliert. Die Verankerung der Arbeiten des PSI im PEFC-Bereich ins entsprechende Projekt der IEA kann diskutiert werden, wenn es neu definiert wird. Auch die Beteiligung der Schweizer Forschergruppen an den Forschungsrahmenprogrammen der EU ist überdurchschnittlich. Dieser Stand muss auch in den Jahren 2008 – 2011 gehalten werden.

8. Beteiligung der Privatwirtschaft

Aufgrund des kaum etablierten Markts für Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Technologien im Energiebereich aber auch aufgrund des geringen Interesses an diesen Technologien in der Schweiz ist die Beteiligung der Privatwirtschaft gemessen an den vorhandenen Forschungskompetenzen zu gering.

Hohe Chancen werden in der Schweiz im Bereich der Zulieferindustrie und Originalgerätehersteller gesehen. Eine aktive Integration in internationalen Realisierungsnetzwerken über die ganze Wertschöpfungskette sind das Ziel. Die Beteiligung der Privatwirtschaft muss in der Periode 2008 – 2011 aktiv angegangen werden. Für diesen Schwerpunkt müssen direkte Gespräche mit potentiellen Unternehmen geführt und geeignete Zusammenarbeitsformen mit den involvierten Forschungsunternehmen geschaffen werden (siehe auch Punkt 9). Die Involvierung der Privatwirtschaft wird nur gelingen, wenn die Unternehmen klare Vorteile aus einem Engagement erwarten können. Dies ist stark abhängig von den politischen Rahmenbedingungen (siehe Punkt 1) und von der industriellen Dynamik im internationalen Umfeld. Der stärkste Treiber könnte demnach die europäische Joint Technology Initiative Wasserstoff und Brennstoffzellen sein, falls sie von der Kommission angenommen wird (siehe Kapitel 4).

9. Umsetzung in Prototypen

Um bei den ambitionierten Plänen der europäischen Union einer Rolle spielen zu können, muss die Schweiz aktiver werden bei der Umsetzung in Prototypen. In der Periode 2008 – 2011 ist ein Schwerpunkt zu setzen bei der Gebäude integrierten Wasserstoffproduktion und im Mobilitätsbereich, wobei jeweils die gesamte Kette von Produktion bis und mit dem Verbraucher zu demonstrieren ist. In beiden Anwendungsbereichen sind eine kritische Masse und ein Potential vorhanden. 2011 sollen vorbereitende Teilarbeiten in Angriff genommen und je nach Engagement der Privatwirtschaft und der Budgetsituation systembedingte Umsetzungsschritte in Angriff genommen werden.

10. Ausbildung

Die Forschung in den Gebieten Wasserstoff und Brennstoffzellen wird stark getragen von Doktoranden, die von den einzelnen Forschungsinstitutionen betreut werden. Aufgrund der anspruchsvollen und in die Zukunft gerichteten Forschungsthemen bestehen kaum Probleme gute Wissenschaftler zu finden. Diese Situation muss mit attraktiven Projekten und Arbeitsbedingungen für die Wissenschaftler gehalten werden.

11. Information

Die Information und Akzeptanz muss auf allen Ebenen verstärkt werden. Zentral ist die Information an Firmen, welche für die Umsetzung der Forschungsresultate in Frage kommen und an potentielle Anwender der Technologien, wie Kommunen, Energieversorger und energieintensive Unternehmen. Neben den Instrumenten der Programme Wasserstoff und Brennstoffzellen - Impulstag, Internet, Jahresbericht, andere Publikationen, Informationskampagne im Rahmen von z.B. energia, Hydropole etc.) ist u.a. auch EnergieSchweiz zur Verstärkung und Adressierung von Politik, Öffentlichkeit und Nachwuchs zu gewinnen.

12. Finanzen

In Kapitel 6 wurden die Vorgaben in Form einer Mittelerhöhung erörtert. Wichtig sind insbesondere Mittel für Pilot- und Demonstrationsprojekte (siehe auch Punkte 8 und 9). Bei der Budgetverteilung 2008 für das BFE wurden die Mittel für die Energieforschung nicht erhöht. Die Hoffnungen liegen nun bei den geplanten Budgeterhöhungen im Rahmen der Aktionsprogramme für erneuerbare Energien und Energie-Effizienz. Ausserdem muss durch ein aktives Einbringen qualitativ hoch stehender Projekte versucht werden, die nicht an das Thema Energie gebundenen zusätzlichen Mittel der BFI-Botschaft und der europäischen Forschungsrahmenprogramme zu mobilisieren.

Referenzen

[1] ***Konzept der Energieforschung des Bundes 2008 – 2011***, Bundesamt für Energie, April 2007, Download: www.energieforschung.ch.

[2] ***Projektliste der Energieforschung des Bundes 2004/2005***, Bundesamt für Energie, Januar 2007, Download: www.energieforschung.ch.

[3] ***Hydrogen Energy and Fuel Cells - A vision of our future,*** European Hydrogen and Fuel Cell Technology Platform (HFP), February 2005 https://www.hfpeurope.org/hfp/keydocs.

[4] ***Strategic Research Agenda,*** European Hydrogen and Fuel Cell Technology Platform (HFP), April 2005 https://www.hfpeurope.org/hfp/keydocs.

[5] ***H2FC Education&Training Programme,*** European Hydrogen and Fuel Cell Technology Platform (HFP), July 2005 https://www.hfpeurope.org/hfp/keydocs.

[6] ***Deployment Strategy,*** European Hydrogen and Fuel Cell Technology Platform (HFP), August 2005 https://www.hfpeurope.org/hfp/keydocs.

[7] ***Implementation Plan,*** European Hydrogen and Fuel Cell Technology Platform (HFP), January 2007 https://www.hfpeurope.org/hfp/keydocs.

[8] ***Prospects for Hydrogen and Fuel Cells,*** International Energy Agency, 2005, www.iea.org/books.

[9] ***IEA Energy Technology Essentials - Hydrogen Production and Distribution,*** International Energy Agency IEA, April 2007, www.iea.org/Textbase/techno/essentials.htm

[10] ***IEA Energy Technology Essentials – Fuel Cells,*** International Energy Agency IEA, April 2007, www.iea.org/Textbase/techno/essentials.htm

[11] ***Mikrozensus Verkehrsverhalten,*** Bundesamt für Statistik, 2005, www.bfs.admin.ch/bfs/portal/de/index/themen/11/07/01/02/01.html

[12] ***Aktionsplan Erneuerbare Energien und Aktionsplan Energieeffizienz,*** BFE, September 2007, http://www.bfe.admin.ch/dokumentation/00459/index.html?lang=de&dossier_id=01503

[13] ***Programm EnergieSchweiz,*** http://www.bfe.admin.ch/energie/index.html?lang=de